

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ОСНОВИ МЕТРОЛОГІЇ

Конспект лекцій до вивчення кредитного модуля дисципліни
«Основи метрології»

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для студентів,
які навчаються за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»,*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2020

Основи метрології: конспект лекцій до вивчення кредитного модуля дисципліни «Основи метрології» [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад Л. М. Павлов – Електронні текстові дані (1 файл: 4,124Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 126 с.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 2 від 01.10.2020 р.)
за поданням Вченої ради Факультету електроніки (протокол № 5/2020 від 25.05.2020 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

ОСНОВИ МЕТРОЛОГІЇ

Конспект лекцій

Укладач: Павлов Леонід Миколайович, канд. техн. наук, доц

Відповідальний
редактор: Кучернюк П.В., канд. техн. наук, доц.

Рецензент: Трапезон К. О., канд. техн. наук, доц.

Надано матеріали відповідно програми навчальної дисципліни «Основи метрології». В виданні наведені короткі відомості про законодавчу метрологію. Переважна кількість тексту стосується технічних засад метрології. На початку надаються первісні знання про вимірювання напруги та струму. Далі – коротке знайомство з мультиметрами. Більш детально представлено роботу з сучасним цифровим осцилографом. Подальші розділи поглиблюють основи сучасного вимірювання малих значень струму та напруги за допомогою підсилювачів. Для розуміння роботи підсилювачів проведено короткий вступ, що пояснює роботу діоду та транзистору. Надалі – диференційного каскаду як першого каскаду операційного підсилювача. На основі початкового уявлення про операційний підсилювач надаються знання про схеми вимірювання напруги та струму, синфазного сигналу та синфазної завади. Надано матеріал про похибки вимірювань, обробку результатів вимірювання. Розглянуто поняття про сигнал як носій інформації. Також приділена увага цифро-аналоговим та аналого-цифровим перетворювачам.

Рекомендовано для студентів першого курсу галузі електронної техніки.

Зміст

1.	Законодавча метрологія. Основні терміни та їх визначення	8
2.	Еталони та зразкові прилади	10
	2.1. Склад еталону напруги	12
	2.2. Основні метрологічні характеристики еталону	12
3.	Технічна метрологія	12
4.	Вимірювання напруги	13
	4.1. Пряме вимірювання напруги	13
	4.2. Опосередковане вимірювання напруги	13
	4.3. Сукупне вимірювання напруги	14
	4.4. Вольтметри	14
5.	Вимірювання струму	18
	5.1. Навчальна модель джерела струму	19
	5.2. Схема вимірювання струму	20
	5.3. Розширення діапазону вимірювання	21
6.	Мультиметр	24
7.	Сигнали	26
	7.1. Види сигналів	27
	7.2. Характеристики сигналів	28
	7.3. Ортогональні сигнали.	28

7.4. Спектр сигналу	29
8. Осцилограф	29
8.1. Класифікація осцилографів	30
8.2. Дослідження періодичного сигналу	35
8.3. Основи синхронізації цифрового осцилографа	41
8.4. Реєстрація та збереження результатів тестів осцилографа	47
8.5. Компенсація пасивних пробників 10: 1	53
8.6. Навантаження пробників	56
8.7. Швидке перетворення Фур'є	58
8.8. Амплітудно-частотна і фазо-частотна характеристика на екрані осцилографу	60
8.9. Інші параметри	62
9. Технічні основи вимірювання	63
9.1. Класифікація вимірювань	63
9.2. Похибки вимірювань	64
9.3. Похибки приладів	65
9.4. Непрямі та сукупні вимірювання	66
9.5. Визначення випадкових похибок прямого вимірювання	68
9.6. Визначення випадкових похибок опосередкованого вимірювання	69

10.	Підсилювачі сигналу для схем вимірювання	70
10.1.	Поняття про діод та біполярний транзистор	70
10.2.	Транзистор	72
10.3.	Схеми підключення транзисторів	76
10.4.	Схема зі спільним емітером	76
10.5.	Схема зі спільною базою	77
10.6.	Схема зі спільним колектором (емітерний повторювач)	79
10.7.	Диференційні підсилювачі	80
10.8.	Простий диференційний підсилювач	80
10.9.	Диференційний підсилювач з генератором струму	84
10.10.	Операційний підсилювач	87
11.	Схеми перетворення сигналів та вимірювання	90
11.1.	Перетворення значення струму в напругу	90
11.2.	Найпростіший перетворювача струм-напруга	91
11.3.	Схема масштабного підсилення напруги на операційному підсилювачі	92
11.4.	Масштабний підсилювач напруги без зміни знаку	93
11.5.	Вимірювальний підсилювач	94
11.6.	Універсальна схема вимірювання струму	97
11.7.	Перетворення змінної напруги в постійну.	98

11.8.	Повторювач на ОП	100
11.9.	Пристрій вибірки та зберігання	100
12.	Цифро-аналогові перетворювачі	101
12.1.	ЦАП на основі широтно-імпульсної модуляції	103
12.2.	ЦАП на конденсаторах, що перемикаються	104
12.3.	Паралельні ЦАП	105
13.	Аналого-цифрові перетворювачі	109
13.1.	Паралельні АЦП	111
13.2.	Послідовно-паралельні АЦП	113
13.3.	АЦП послідовного відліку	117
13.4.	АЦП послідовного наближення	119
13.5.	Інтегруючі АЦП	120
13.6.	Сігма-дельта АЦП	123

Вступ

Надано матеріали відповідно програми навчальної дисципліни «Основи метрології». В виданні наведені короткі відомості про законодавчу метрологію. Переважна кількість тексту стосується технічних засад метрології. При створенні підручника враховано досвід попередньої підготовки школярів в лабораторії Lampara Kids до спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» та виклали матеріал від початкового поняття про діод та транзистор до аналого-цифрового перетворювача. Спочатку надаються первісні знання про вимірювання напруги та струму переважно приладом прямого вимірювання. Далі – коротке знайомство з мультиметрами. Більш детально представлено роботу з сучасним цифровим осцилографом, в якого частота виборки сигналу перевищує 2,2 ГГц. Подальші розділи поглиблюють основи сучасного вимірювання малих значень струму та напруги за допомогою підсилювачів Далі – про диференційний підсилювачів. Для розуміння роботи підсилювачів проведено короткий вступ, що пояснює роботу діоду та транзистору. Надалі – диференційного каскаду як першого каскаду операційного підсилювача. На основі початкового уявлення про операційний підсилювач надаються знання про схеми вимірювання напруги та струму, синфазного сигналу та синфазної завади. Надано матеріал про похибки вимірювань, обробку результатів вимірювання. Розглянуто поняття про сигнал як носій інформації. Також приділена увага цифро-аналоговим перетворювачам та основним класам аналого-цифрових перетворювачів: паралельного типу, послідовно-паралельні (багатоступінчаті, багатотактні та конвеєрні), послідовного відліку, послідовного наближення, інтегруючі та сігма-дельта.

1. Законодавча метрологія.

Основні терміни та їх визначення

Згідно закону України "Про метрологію та метрологічну діяльність" та стандарту [1] наведені нижче терміни вживаються у такому значенні :

Метрологія — наука про вимірювання, яка включає як теоретичні, так і практичні аспекти вимірювань у всіх галузях науки і техніки;

Законодавча метрологія – частина метрології, що містить законодавчі акти, правила, вимоги та норми, які регламентуються і контролюються державою для забезпечення єдності вимірювань;

Вимірювальна величина – фізична величина чи параметри її залежності, що підлягають вимірюванню;

Вимірювання — відображення фізичних величин їхніми значеннями за допомогою експерименту та обчислень із застосуванням спеціальних технічних засобів;

Одиниця вимірювань — фізична величина певного розміру, прийнята для кількісного відображення однорідних з нею величин;

Єдність вимірювань — стан вимірювань, за якого їхні результати виражаються в узаконених одиницях вимірювань, а похибки вимірювань відомі та із заданою ймовірністю не виходять за встановлені межі;

Методика виконання вимірювань — сукупність процедур і правил, виконання яких забезпечує одержання результатів вимірювань з потрібною точністю;

Фізична величина – властивість, спільна в якісному відношенні у багатьох матеріальних об'єктів та індивідуальна в кількісному відношенні у кожного з них;

Розмір фізичної величини – кількісний вміст фізичної величини в даному об'єкті;

Система фізичних величин – сукупність взаємопов’язаних фізичних величини. В якій декілька величин приймають за незалежні, а інші визначають як залежні від них;

Основна фізична величина – фізична величина, що входить у систему величин та визначається через основні величини цієї системи;

Розмірність фізичної величини – вираз, що відображає її зв’язок з основними величинами системи величин;

Одиниця фізичної величини – фізична величина певного розміру, прийнята за угодою для кількісного відображення однорідних з нею величин;

Система одиниць фізичних величин – сукупність одиниць певної системи фізичних величин;

Засіб вимірювальної техніки (ЗВТ) — технічний засіб, який застосовується під час вимірювань і має нормовані метрологічні характеристики; До засобів вимірювальної техніки відносяться засоби вимірювань та вимірювальні пристрої.

Тип засобу вимірювальної техніки — сукупність засобів вимірювальної техніки одного і того ж призначення, які мають один і той же принцип дії, однакову конструкцію та виготовлені за однією і тією ж технічною документацією;

Засіб вимірювань — засіб вимірювальної техніки, який реалізує процедуру вимірювань. До засобів вимірювань відносяться кодові засоби вимірювань, реєструючі засоби вимірювань, вимірювальні прилади та вимірювальні системи.

Вимірювальний прилад— засіб вимірювань, в якому створюється візуальний сигнал вимірювальної інформації.

Еталон — засіб вимірювальної техніки, що забезпечує відтворення і (чи) зберігання одиниці вимірювань одного чи декількох значень, а також передачу розміру цієї одиниці іншим засобам вимірювальної техніки.

Первинний еталон – еталон, що забезпечує відтворення та (або) зберігання одиниці фізичної величини з найвищою в країні (у порівнянні з іншими еталонами тієї ж одиниці) точністю;

Державний еталон — офіційно затверджений еталон, який забезпечує відтворення одиниці вимірювань та передачу її розміру іншим еталонам з найвищою у країні точністю;

Робочий еталон — еталон, призначений для повірки чи калібрування засобів вимірювальної техніки;

Міжнародний еталон – еталон, який за міжнародною угодою призначений для погодження розмірів одиниць, що відтворюються і зберігаються державними (національними) еталонами;

Зразковий засіб вимірювальної техніки (засіб вимірювань) – засіб вимірювальної техніки (засіб вимірювань), який служить для повірки інших засобів вимірювальної техніки (вимірювання) і затверджений як зразковий;

Вихідний еталон — еталон, який має найвищі метрологічні властивості серед еталонів, що є на підприємстві чи в організації;

Повірка засобів вимірювальної техніки— встановлення придатності засобів вимірювальної техніки, на які поширюється державний метрологічний нагляд, до застосування на підставі результатів контролю їхніх метрологічних характеристик;

Калібрування засобів вимірювальної техніки — визначення в певних умовах або контроль метрологічних характеристик засобів вимірювальної техніки, на які не поширюється державний метрологічний нагляд;

2. Еталони та зразкові прилади

У 1960 році XI Генеральною конференцією з мір та ваги було ухвалено новий **хвильовий еталон метра**, який виражається у довжинах світлових хвиль у вакуумі оранжевої лінії спектру криптону-

86. Відповідно до рішення конференції "метр — це довжина, що дорівнює 1 650 763,73 довжин хвиль випромінювання у вакуумі й відповідає переходу між рівнями $2p_{10}$ та $5d_5$ атома криптону-86". В Україні еталон метра зберігається у Харківському науково-виробничому об'єднанні "Метрологія". За рішенням останньої Генеральної конференції з мір і ваги ухвалене таке визначення одиниці довжини метр: метр — довжина шляху, який проходить світло у вакуумі за $1/299\,792\,458$ частину секунди.

При встановленні метричної міри за одиницю маси прийнято масу одного кубічного дециметра чистої води при температурі, що забезпечує її найбільшу густину ($4\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Виготовлений на основі точних зважувань перший прототип кілограма є платиновою циліндричною гирею висотою 39 мм, що дорівнює діаметру циліндра.

Нове визначення секунди – це інтервалу часу, протягом якого відбувається 9 192 631 770 коливань. Такі коливання відповідають резонансній частоті енергетичного переходу між рівнями надтонкої структури основного стану атома цезію-133 за відсутності збурень зовнішніми полями.

Ампер — сила незмінного струму, який проходячи по двох паралельних прямолінійних провідниках нескінченної довжини і занадто малого круглого перерізу та розміщеними на відстані 1 метра один від одного у вакуумі, при силі струму в провідниках в 1 А утворював би між провідниками силу взаємодії у $2 \cdot 10^{-7}$ Н на кожний метр довжини".

Одиниця сили світла кандела. Це світло, яке випромінюється з площини перерізом $1/600\,000\text{ м}^2$ повного випромінювача у перпендикулярному до цього перерізу напрямку при температурі твердіння платини і тиску в 101 325 Па.

Еталон Вольта . Створено цілий напрямок поточного відтворення еталону на основі переходів Джеферсона. Ось один з багатьох прикладів [3].

2.1. Склад еталону

Основа еталону напруги – відтворення напруги на виході мікросхеми з 19700 переходів Джеферсона [3]. Окрім мікросхеми містить кріозонд і генератор Ганна на частоті 75 ГГц. А також: ємність Дюара з рідким гелієм, керуючий комп'ютер, блок живлення; трьохканальний перемикач полярності, нуль-детектор на основі нановольтметра, частотомір (578 EIP Microwave); супутникову антену, автоматизоване робоче місце що містить дві групи термостатованих міри напруги. ВВ перелік також входить апаратура для передачі одиниць напруги до 1000 В, калібратор типу 5720А, вольтметр 3458А, дільник, перемикач діапазонів та полярності.

2.2. Основні метрологічні характеристики еталону

- Відтворення значень напруги від -10В до +10В.
- Середнє квадратичне відхилення результату: відхилення напруги не перевищує $1 \cdot 10^{-9}$ В за 40 незалежних спостережень впродовж доби.
- Систематична похибка не більше $1 \cdot 10^{-9}$ В.

3. Технічна метрологія

Основними операціями метрології радіоелектроніки є вимірювання струму та напруги.

Сучасні схеми вимірювання цих величин базуються на застосуванні так званих вимірювальних підсилювачів та аналого-цифрових перетворювачів (АЦП). Але першими з'явилися прилади, що засновані на взаємодії магнітного поля та струму, що протікає через так звану поворотну рамку, до якої прикріплена стрілка приладу. Такі

прилади не потребують живлення і досі є актуальними. Отже розгляд приладів почнемо саме з них.

4. Вимірювання напруги

Напругу можливо вимірювати прямо або опосередковано, що передбачено ДСТУ [2]. Для вимірювання напруги зазвичай використовують спеціалізовані прилади, які називаються вольтметри, або універсальні – ампер-вольт-ом-метри, скорочено – авометри, мультиметри.

4.1. Пряме вимірювання напруги.

Пряме вимірювання напруги передбачає підключення вимірювального приладу – вольтметра (мілівольтметра) до точок вимірювання напруги. Передбачається, що:

1. Вольтметр відградує відповідно до еталону вольт [2], або, що частіше – до його тих чи інших копій еталону або зразкових приладів [3].
2. Вхідний опір вольтметра багато більше, ніж опір схеми між точками вимірювання. Багато більше – це 10 і більше разів. Чим більше – тим точніше вимірювання, тим менше впливання на схему, що досліджується.

Існують також спеціальні вольтметри для вимірювання наднизьких та надвисоких значень напруги. Такі прилади не розглядаються в даному курсі.

4.2. Опосередковане вимірювання напруги

Опосередковане вимірювання напруги, як прилад найчастішого випадку непрямого вимірювання, передбачає вимірювання струму амперметром (міліамперметром, мікроамперметром) через резистор з відомим опором [1]. Результати вимірювання знаходять за законом Ома

для ділянки кола як $U = IR$, де U – результат, I – показання амперметра, R – величина каліброваного (тестового, відомого) опору.

4.3. Сукупне вимірювання напруги

Сукупне вимірювання напруги передбачає можливість такого непрямого вимірювання, де результат буде знайдений як вирішення рівнянь, в яких відомими будуть результати вимірювання, а невідомою величиною – напруга, що відомою залежністю пов'язана з іншими величинами, які вимірюються в експерименті. Такі вимірювання застосовуються в першу чергу для дуже малих або дуже великих значень напруги, якщо відома залежність цієї напруги від тих величин, що можуть бути виміряні з достатньою точністю. Приклад сукупного вимірювання та обґрунтування буде наведено пізніше. Зокрема це стосується вимірювань стосовно елементів мікроелектроніки в модулях мікросхем на платівці. Але, поки не розглянуті самі мікросхеми, то питання про їх вимірювання ставити не доцільно.

4.4. Вольтметри

Вольтметри за принципом роботи розрізняються на прилади прямого вимірювання та електронні, що мають підсилювач, аналого-цифровий перетворювач тощо.

Вольтметри за призначенням поділяються на вольтметри постійної напруги та вольтметри змінної напруги. В свою чергу вольтметри змінної напруги розрізняються за ознаками напруги, яку вимірюють: у вигляді синусу, трапеції, трикутну чи будь якої форми. Як видно з цього ще не повного переліку до вимірювання потрібно відноситися надзвичайно уважно з виконанням вимог ДСТУ [2].

Опосередковане вимірювання за допомогою амперметра та тестового опору має той недолік, що вимагає послідовного включення амперметра у коло вимірювання. Отже це коло потрібно спочатку

розірвати, в розрив включити амперметр та підбати, аби сам амперметр не вніс спотворень в роботу кола. Для цього потрібно знати особливості приладів для вимірювання струму та напруги.

Свого часу найбільше поширення набули вольтметри прямого вимірювання без підсилювача, що використовували ефект взаємодії потоку електронів з магнітним полем. Принцип дії пояснюється виникненням сили Ампера від взаємодії магнітного поля зі струмом, що протікає через рухому рамку. Сам магніт складав частину приладу. Потік електронів – це струм, що проходив через прилад. В результаті такої взаємодії виникає сила Ампера, а також і сила Лоренца, що пропорційна швидкості потоку, тобто струму, яку і використовують для індикації результату вимірювання. Перевага таких приладів – не потребують зовнішнього джерела живлення. Недолік – використовують для роботи енергію джерела інформації.

Розглянемо як приклад магнітоелектричну головку приладу для вимірювання напруги за рахунок відгалуження частки струму від джерела інформації [4]. Баланс енергії головки магнітоелектричного приладу утворюється як сума енергії поля магніту $W_{\text{пм}}$, енергії котушки зі струмом та енергії взаємодії поля магніту і котушки зі струмом. Частка енергії, що утворюється при взаємодії потокозчеплення Ψ та електричного струму I у котушці в магнітному полі пропорційна їх добутку $\Psi \cdot I$. Якщо котушка, або як її ще називають – рамка, повертається на кут α , то

$$\Psi = B \cdot n \cdot s \cdot \alpha$$

де B — магнітна індукція в зазорі, Тл; s — площа обох сторін котушки, м^2 , n - число витків її обмотки котушки-рамки. Вся енергія, що викликає обертання рамки приладу

$$W_{\text{ем}} = W_{\text{пм}} + L \cdot I^2 / 2 + B \cdot n \cdot s \cdot \alpha \cdot I$$

Де $W_{\text{пм}}$ – енергія постійного магніту, L – індуктивність рамки.

Варто звернути увагу на те, що індуктивність L залежить від кількості витків n . Схематично головка вимірювального приладу наведено на рис. 1. Повне відхилення стрілки утворюється, коли струм через рамку

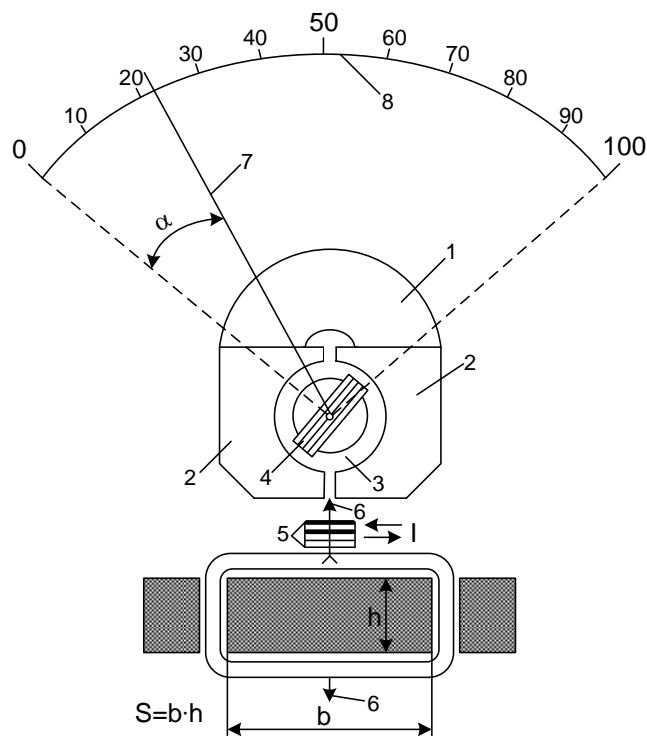


Рис. 1. Принцип облаштування магнітоелектричної головки:

1 — постійний магніт з магнітотвердого матеріалу; 2 і 3- полюсні наконечники та осердя із магнітом'якого матеріалу; 4 - рухома рамка; 5 - спіральні пружини повернення стрілки в нуль; 6 - керн або розтяжка; 7 - стрілка; 8 - шкала

досягає 100 мкА. Отже для вимірювання струму в межах 100 мкА досить застосувати саму головку. Виникає питання: чи є обмеження для такого вимірювання? Так, є. При повному відхилення стрілки

напруга на затискачах мікроамперметра не повинна перевищувати певну величину. Така напруга має бути не більша 100 мВ. Зазвичай маємо в користуванні головки з опором рамки $R_{in} = 640 \text{ Ом}$, або $R_{in} = 750 \text{ Ом}$. Отже напруга на затискачах приладу не перевищує 100 мВ.

Для вимірювання напруги потрібно створити такий режим роботи вимірювальної головки, аби при досяганні найвищої точки діапазону вимірювання струм через неї дорівнював 100 мкА. Така мета досягається, коли послідовно з рамкою включити додатковий резистор. Отже, вимірювальна головка і послідовний резистор утворюють схему вимірювання напруги, а сам прилад стає вольтметром. Але потрібно враховувати і опір рамки приладу R_{in} . Нехай потрібно утворити схему вимірювання напруги в межах 10 В.

Спосіб 1. Скористаємось законом Ома. Тоді має місце рівняння $10 \text{ В} = 100 \text{ мкА} (R_{in} + R_x)$, де R_x – той опір додаткового резистора, який маємо додати до вимірювальної головки. Нехай $R_{in} = 640 \text{ Ом}$. Тоді $10 \text{ В} = 100 \text{ мкА} (640 + R_x)$. Вирішення дає $(10 \text{ В} - 0,064 \text{ В}) / 100 \text{ мкА} = 9,036 \text{ В} / 100 \text{ мкА} = 90,36 \text{ кОм}$.

Спосіб 2. Дізнаємось, який має бути загальний опір схеми вимірювання: $R_{in} + R_x = 10 \text{ В} / 100 \text{ мкА} = 100 \text{ кОм}$. Але опір вимірювальної головки $R_{in} = 640 \text{ Ом}$. Тоді додатковий опір $R_x = 100000 \text{ Ом} - 940 \text{ Ом} = 90360 \text{ Ом} = 90,36 \text{ кОм}$.

Різними шляхами отримали однаковий результат. Схема вимірювання напруги в межах 10 В наведена на Рис.2, де $R1$ – додатковий резистор. Номінальні значення вказані в омах. Аналогічно визначається номінальне значення додаткового резистора для інших меж вимірювання.

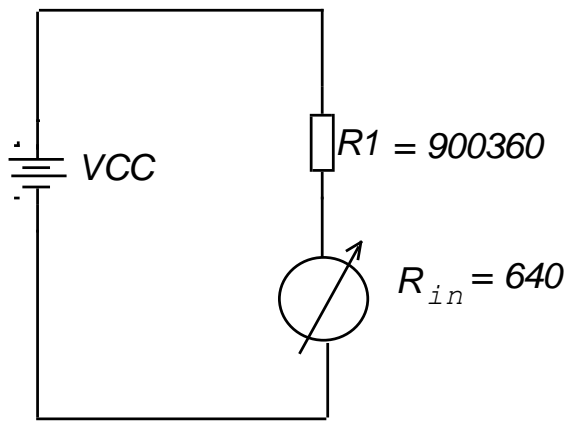


Рис. 2. Схема вимірювання наруги в межах 10 В

Для вимірювання малих величин наруги використовують підсилювачі: диференційні, операційні, вимірювальні, електрометричні та ін. Деякі з цих підходів будуть розглянуті пізніше.

5. Вимірювання струму

Для того, щоб виміряти струм, потрібно спочатку його утворити. Для цього використати джерело енергії: наруги чи струму. Такі джерела класифікуються за внутрішнім опором. Джерело наруги має малий внутрішній опір, а джерелу струму – високий. Тому за допомогою джерела наруги та резистора можливо утворити найпростіший дослід з вимірювання струму. Інакше кажучи: за допомогою джерела наруги та резистора можливо утворити модель джерела струму. Чому так? З точки зору джерела енергії джерело наруги приносить більшу користь, бо енергія не втрачається на внутрішньому опорі і тому не переходить у тепло. А джерела струму найчастіше створюються для потреб різноманітних технічних проектів, наприклад, для диференційного підсилювача, схема якого розглядається в наступних розділах.

Отже, за визначенням ідеальне джерело струму має нескінченно високий внутрішній опір. Саме цим воно відрізняється від джерела наруги, бо в джерела наруги внутрішній опір прагне до нуля.

5.1. Навчальна модель джерела струму

Утворимо навчальну модель джерела струму з джерела напруги та резистора, що має високий опір. Нехай джерело напруги $VCC=50\text{ В}$. Послідовно до джерела напруги включимо резистор на $R1=500\text{ кОм}$, Рис.3. Вважаємо, що внутрішній опір ключа K дорівнює нулю, тобто це – математично абстрактна модель. Якщо замкнути ключ K , то через ключ буде протікати струм $I=50\text{ В} / 500\text{ кОм} = 100\text{ мкА}$. Звідси маємо:

Висновок 1. Джерело струму на відміну від джерела напруги можемо замикати без таких наслідків, як коротке замикання. Аварія не виникатиме.

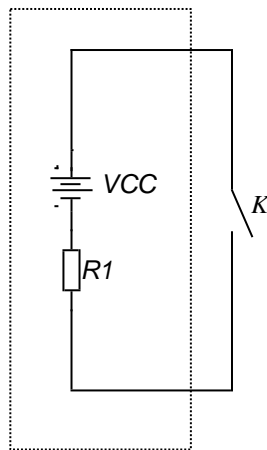


Рис. 3. Схема утворення джерела

Висновок 2. Ідеальний вимірювач струму повинен мати нульовий внутрішній опір. Тоді він не впливатиме на рівень струму, який вимірює.

Висновок 3. Для того, щоб виміряти струм, обов'язково потрібно розірвати коло, в якому протікає струм, включити в розрив вимірювач струму і цим відновити електричний зв'язок у колі струму, бо вимірювач струму слугуватиме провідником струму через свій нульовий внутрішній опір.

Висновок 4. Ідеальний вимірювач струму не вносить спотворень у колі вимірювання струму.

Щодо висновку 1, то в даному випадку обмеженням струму є внутрішній опір самого джерела струму. На моделі, Рис.3 він позначений як $R1$.

5.2. Схема вимірювання струму

Тепер, замість ключа включимо вимірювач струму. За визначенням опір вимірювача прагне до нуля. Як вже зазначено в попередньому розділі, для вимірювання струму в межах 100 мкА досить застосувати саму головку. Але вона має власний внутрішній опір, Рис.4. Отже вимірювач не зможе показати розрахункові 100 мкА. Результат вимірювання, за умови ідеальної установки наруги і ідеальної точності резистора має бути $I = 10 \text{ В} / (500000 + 640) \text{ Ом} = 99,87 \text{ мкА}$. Такий результат дещо нижчий за, ніж у випадку ідеального вимірювача. Але чи помітить це спостерігач, який здійснює вимірювання? Вельми сумнівно. Бо резистор не можливо підібрати на 500 кОм точно. Для цього потрібен спеціальний так званий магазин опорів, які все одно мають межу точності. Виставити джерело напруги точно на 50 В – також не можливо, бо існує не тільки похибка виставляння на номінальне значення, а й похибка утримання

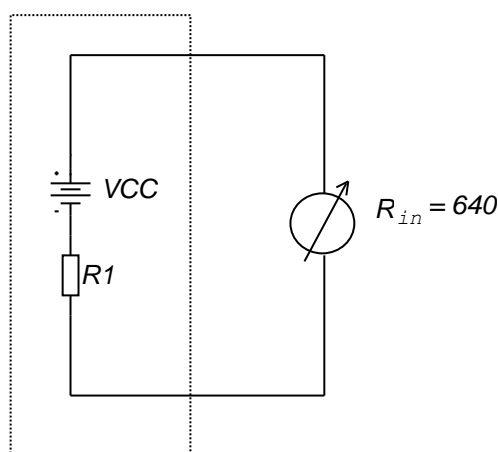


Рис. 4. Схема вимірювання струму від джерела струму

режиму роботи. Для цього потрібні паспортні дані на обладнання, що приймає участь в нашому експерименті. А от систематичну похибку Δ ми можемо підрахувати прямо зараз. Вона складає відношення опорів: внутрішнього опору вимірювальної головки до внутрішнього опору джерела струму $\Delta = 640 \text{ Ом} / 500 \text{ кОм} = 0,00128$ або $0,128\%$. Коли відома систематична похибка Δ , то результат вимірювання можна скоригувати, в даному випадку збільшити на $0,128\%$.

5.3. Розширення діапазону вимірювання

Якщо потрібно вимірювати більші струми, то в прилад відгалужують тільки частину струму, який потрібно виміряти. Решту струму направляють в обхід вимірювальної головки. Такий спосіб називають *by pass*. Варто нагадати, що це за принципом те ж саме, як підключають батареї центрального опалення до основних вертикальних труб: тільки частка теплового носія надходить до радіатора певної квартири.

Отже, завдання полягає в тому, аби створити схему вимірювання струму з додатковим елементом, який відбирав би на себе левову частку струму. Таким елементом називається шунт. Шунт – це додатковий резистор з низьким опором. Зазвичай його опір менше опору рамки вимірювальної головки. А шунти, що потрібні для вимірювання великих струмів, навіть складно назвати резисторами. Це спеціальні пластини з кріпленням на кінцях «під гвинт та гайку». Матеріал пластини виготовляють з термостабільного сплаву. Опір пластини підганяється до потрібного значення завдяки механічній обробки. Іноді – просто прорізають частину матеріалу пластини для досягнення певного опору. Отже тепер залишається лише визначити опір шунта.

Нехай вирішується задача вимірювання струму в діапазоні 100 мА. Такий струм в 1000 разів перевищує максимальний струм нашої вимірювальної головки. Потрібний опір схеми вимірювання буде 0,640 Ом. Чи можна записати 0,64 Ом? Ні. В метрології останній розряд вказує на точність вимірювання. Тому правильний запис буде саме 0,640 Ом. Тоді, для паралельного включення резисторів маємо: $1/0,640 = 1/640 + 1/R_x$, де R_x – опір шунта. Нескладні перетворення – $R_x = 1/(1/0,640 - 1/640) = 640/(1000-1) = 0,64064$. Значення шунта – в Омах. Аналогічно розраховується значення шунта для інших меж вимірювання. Схема для вимірювання струму в межах 100 мА за допомогою вимірювальної головки на 100 мкА наведено на Рис.5,

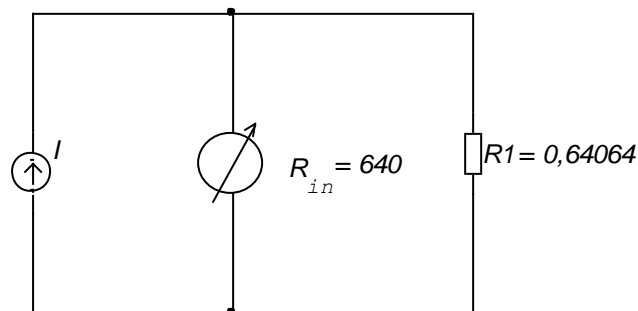


Рис. 5. Схема вимірювання наруги в

де I – джерело струму. Зовні проста схема вимірювання, Рис.1, потребує пояснення. Джерело струму I осягнути не так просто. Потрібно розуміти, що на рис.3 джерело струму I - це перш за все математична модель абстрактного пристрою, який видає струм заданої величини. Реально такі джерела струму створюють за спеціальними схемами. Але джерела струму не можливо створити без джерела напруги. Те, що схема вимірювання має такий вигляд, наче вимірюється напруга має також подвійний сенс. По-перше, вимірювач струму включається послідовно в коло, що «розривається, а потім замикається нульовим опором вимірювача струму». Але, у випадку застосування шунта проявляється **парадокс**: вимірювальна головка використовується дійсно в якості вольтметра. Доведення цього факту

полягає у співставленні внутрішнього опору вимірювальної головки і опору шунта – опір шунта в тисячу разів менше опору головки. Отже парадокс доведено: в схемі з шунтом вимірювальна головка виконує роль вольтметра. Саме тому за текстом вона не позначається як мікроамперметр, бо має подвійну функцію.

Розглянемо типову задачу вимірювання струму через довільний резистор $R1$ в схемі H , Рис.6, де резистор вже умовно виділено двома виводами. Потрібно виміряти струм амперметром. Схема підключення амперметра до резистора $R1$ наведена на Рис.7.

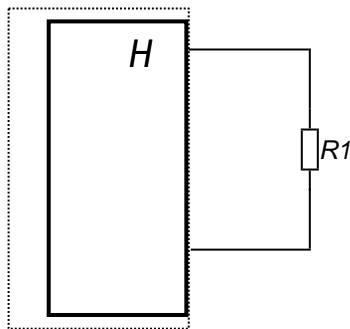


Рис. 6. Схема з невідомим струмом через резистор $R1$

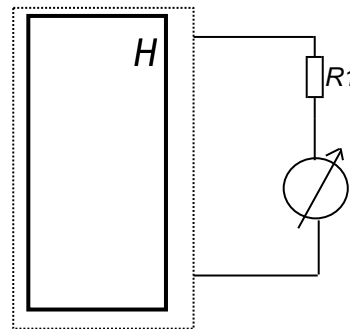


Рис. 7. Схема підключення амперметра до резистора $R1$

Якщо номінальне значення резистора відоме, то можна виміряти напругу на резисторі вольтметром V і обрахувати струм за законом Ома, Рис. 8.

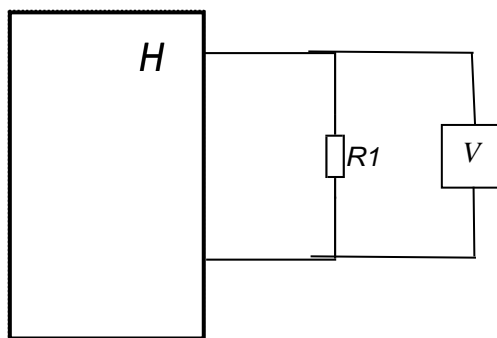


Рис. 8. Схема підключення вольтметра до резистора $R1$ при непрямому вимірюванні

Для вимірювання малих струмів застосовуються спеціальні схеми, що побудовані, наприклад, за допомогою так званих операційних підсилювачів, які в свою чергу побудовані за допомогою транзисторів – напівпровідникових приладів. Аби розуміти, як працюють підсилювачі, без яких метрологія не існує, у наступних розділах перейдемо до найпростішого тлумачення р-п-переходу, діоду та транзистора. Це буде лише сама сутність, спрощено, тому не складно, а поки продовжимо розгляд приладів без втручання у внутрішню структуру.

6. Мультиметр

Мультиметр – найбільш поширений клас приладів, що використовується для вимірювання постійної та змінної напруги, струму, опору, в тому числі і перевірки ізолюваного дроту на обрив, ємності та навіть посилення транзисторів, як це видно на Рис.9.



Рис.9. Поширені варіанти мультиметра широкого вжитку

Такі мультиметри містять власне джерело опорної напруги (ДОН) відносно котрого порівнюється та напруга що вимірюється. Для проведення порівняння малої напруги, наприклад, мілівольтів, з джерелом опорної напруги, що може бути зазвичай від 1.2 В до 5 В, використовуються спеціальні так звані операційні підсилювачі, вимірювальні підсилювачі. Для вимірювання струму в таких мультиметрах використовують спеціальні схеми перетворення величини струму в значення напруги, аби порівняти його з ДОН. Для зручності користування застосовують зазвичай цифрові індикатори. Тому такі прилади містять аналого-цифрові перетворювачі. В спрощеній формі такі схеми будуть розглянуті пізніше.

Більш точні лабораторні мультиметри [5-6], Рис.10.

	5.5 digit bench digital multimeter OLED dual display	5½	190	0.0150%	DCV, ACV, DCI, ACI, 2- and 4-wire resistance, frequency, continuity, diode, capacitance, and temperature	USB 2.0, Serial Interface (RS-232), GPIB BenchVue software enabled (page 25)
34450A						
	Bench/System DMM Graphical color dual-line display with histogram and trend charts	6½	300/1000	0.0075/0.0035%	DCV, ACV, DCI, ACI, 2- and 4-wire resistance, frequency, period, continuity, diode, temperature, capacitance	USB, LAN/LXI Core, GPIB, BenchVue software enabled (page 25)
34460A/34461A						
	Bench/System DMM Includes 34461A features plus data logging, digitizing and auto calibration	6½	50,000	0.0030%	DCV, ACV, DCI, ACI, 2- and 4-wire, resistance, frequency, period, continuity, diode, temperature, capacitance, DC ratio	USB, LAN/LXI Core, GPIB optional, BenchVue software enabled (page 25)
34465A						
	Bench/System DMM Includes 34461A features plus data logging, digitizing and auto calibration	7½	50,000	0.0016%	DCV, ACV, DCI, ACI, 2- and 4-wire, resistance, frequency, period, continuity, diode, temperature, capacitance, DC ratio	USB, LAN/LXI Core, GPIB optional, BenchVue software enabled (page 25)
34470A						
	Bench/System DMM Industry standard for accuracy, speed, measurement ease and versatility	6½	1000	0.0035%	DCV, ACV, DCI, ACI, 2- and 4-wire resistance, frequency, period, continuity, and diode.	GPIB, RS-232, DMM Connectivity BenchVue software enabled (page 25)
34401A*						
	Bench/System DMM, dual-line display Highest through-put of benchtop DMMs	6½	10,000 (34410A) 50,000 (34411A)	0.0030%	DCV, ACV, DCI, ACI, 2- and 4-wire resistance, frequency, period, continuity test, capacitance, temperature	USB, LAN/LXI Core, GPIB, BenchVue software enabled (page 25)
34410A/34411A*						
	Nanovolt/μΩ meter Very accurate, low-level measurements	7½	250	0.0030%	DCV, DCI, 2- and 4-wire resistance, 2 channel scanning, temperature	GPIB, RS-232, Intuilink software
34420A						

Рис.10. Лабораторні мультиметри

Вони забезпечують широкий діапазон вимірюваних параметрів, високу точність вимірювань та можливість дистанційної обробки даних вимірювання. Найточніший з наведених на Рис.10 мультиметрів 34420A, забезпечує 7,5 розрядів точності. Такий прилад – мрія дослідника.

Мультиметри – надзвичайно корисні прилади. Але вони вимагають концентрації уваги при користуванні. Дослідник, що захопиться раптовим осяянням, може почати вимірювати напругу, забуваючи про те, що прилад знаходиться в режимі вимірювання струму. Прилад вийде з ладу. Які наслідки неуважності – залежить від конструкції конкретного приладу.

7. Сигнали

Метрологія електроніки в значній мірі орієнтована на дослідження сигналів як матеріальних носіїв інформації.

Класифікація сигналів має різні підходи. Розглянемо деякі різновиди:

Дискретний сигнал – відліки сигналу взяті у дискретні відліки часу, неквантовані за рівнем.

Приклад – сенсори на приладах із зарядовим зв'язком.

Квантований – безперервний за часом, квантований (фіксований) за рівнем.

Приклад – подільник напруги, що керується перемикачем.

Цифровий сигнал – квантований за часом і за рівнем. Найчастіше визначається у двійковій системі. Друга форма цифрового сигналу – фазоімпульсна система, де значення сигналу визначається положенням імпульсу.

Модульовані сигнали – це такі, в яких в якості носія інформації використовуються параметр, наприклад амплітуда.

Модуляція сигналу – використовується для збільшення відстані передачі інформації, а також:

- Підвищення завадостійкості;
- Зменшення потужності передавача – з ростом частоти необхідна для передачі потужність падає;
- Розширення пропускної спроможності каналу зв'язку.

Для цифрових сигналів введена міра інформації – формула Хартлі.

7.1. Види сигналів

Ще один підхід розрізнення сигналів: аналоговий; анізохронний (відліки не синхронні); вхідний; двійковий; дискретний; ізохронний (рівні відліки за часом); кодовий; модульований; (інформаційний); приведений – стандартизований для впливу на об'єкт; сигнал лиха – SOS (save our souls); сигнал синхронізації – періодичний для тимчасового узгодження синхронних операцій; цифровий – квантований за рівнем і значенням інформативного параметру в цифровій формі; похибки, неузгодження – векторна різниця між поточним значенням параметру і заданим рівнем, цей сигнал зазвичай надходить на вхід регульованого пристрою в САР (системи авторегулювання); зворотнього зв'язку, сигнал відлуння системи наведення; сигнал для побутового FM-радіоприймача.

Деякі визначення сигналів можуть бути такі:

- безперервні (аналогові, дискретні, цифрові);
- детерміновані – описуються детермінованими функціями часу: гармонічні, імпульсні пилкокоподібні, дзвіноподібні;
- випадкові: стаціонарні, нестаціонарні (ергодичні);
- періодичні: $x(t) = x(t + nT)$,
де: T – період;
- казуальні – мають початок у часі (не мають початок у часі сигнали магнітометрії Землі);

- фінітні – мають кінець і вони дорівнюють нулю поза інтервалом визначення;
- когерентні – сигнали, що зберігаються в усіх точних визначення (телевізор, RLC, системи NTSC);
- ортогональні сигнали.

7.2. Характеристики сигналів

- тривалість – час передачі;
- ширина спектру;
- база сигналу – добуток ширини спектру на його тривалість;
- динамічний діапазон – логарифми відношення максимальної потужності до мінімальної (на рівні перешкод): $D_c = \log \frac{P_{max}}{P_{min}}$; $D_c = 10 \lg \frac{P_{max}}{P_{min}}$; $D_c = 20 \lg \frac{V_{max}}{V_{min}}$. Одиниця вимірювання - децибел [дБ]. При застосуванні натуральних логарифмів маємо одиницю – непер. Обсяг сигналу $V_c = T_c D_c F_c$, де: T – база (часова); F – ширина спектру; D – динамічний діапазон.

7.3. Ортогональні сигнали.

Ортогональними називаються сигнали, які при перемножуванні та інтегруванні дають нуль. При цьому, якщо кожен з них помножити сам на себе і проінтегрувати, то буде стала величина. Приклад – система тригонометричних функцій для розкладу в ряд Фурье періодичного імпульсу, для яких інтеграл

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sin n \omega t \sin k \omega t dt$$

дорівнює або нулю, або одиниці.

Для функцій Уолша на періоді (інтервалі) визначення (0, T) майже так само

$$\int (Wal(i) * Wal(e)) dt = 0; Wal^2(i) = 1$$

Ортогональні системи сигналів дозволяють будувати оптимальні системи обробки сигналів, що дозволяють видобувати сигнали за їх інформаційним змістом під рівнем шуму 40 і більше дБ. Принципи апаратної обробки ортогональних сигналів ґрунтуються на застосуванні так званих синхронних детекторів, що дозволяє будувати метрологічну апаратуру з високою дозвільною здатністю.

7.4. Спектр сигналу

Будь-який періодичний сигнал може бути побудований за допомогою системи ортогональних функцій. Найчастіше застосовують тригонометричні функції. До них звикли ще з школи, тому вони здаються найбільш прийнятними. Отже, довільний сигнал з періодом T на інтервалі $t = 0 \dots T$

$$S(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_1 t + b_n \sin n\omega_1 t)$$

де $\omega_1 = 2\pi/T$ – кругова частота першої гармоніки, a_n, b_n – спектральні коефіцієнти.

Аналогічні залежності існують для будь-якої системи ортогональних функцій.

8. Осцилограф

Напругу можливо спостерігати та вимірювати осцилографом. Сама по собі така задача може бути розділена на три:

- 1) Постійна напруга. Зазвичай таку напругу простіше та економічно доцільніше виміряти вольтметром. Та мова може йти про чистоту напруги: чи є шум, флуктуації напруги, який характер шуму чи флуктуацій і т.і. Флуктуаціями можуть бути завади від електричних двигунів, силових та виконавчих електроприводів, іскріння між контактами і т.і., що проходять від первинних джерел

енергії на вихід вторинного – лабораторного джерела, чи джерела живлення індустриального обладнання.

- 2) Напруга являє собою періодичний сигнал. Тоді операція спостереження вирішується за допомогою адаптації періоду візуалізації зображення до періоду сигналу. Операція масштабування сигналу за часом називається розгорткою. Час відображення відкладається горизонтально, а межі значень сигналу визначаються вертикально. Сам процес узгодження періодів сигналу і розгортки називається синхронізацією.
- 3) Напруга – одноразовий процес. Це може бути імпульс опромінення, сигнал датчика одноразового удару при випробуваннях і т.п.

Напруга являє собою випадковий процес. Тоді дослідник визначає момент початку спостереження та момент закінчення. Здобуті залежності за часом називають реалізаціями випадкового процесу.

8.1. Класифікація осцилографів

Існують різні підходи до класифікації осцилографів. Історично першими з'явилися так звані шлейфові осцилографи, що записували сигнали на стрічки (шлейфи) за допомогою чорнил. Найвища частота сигналів для таких осцилографів була невисокою і визначалась герцями. Деякі з них могли будувати графіки одночасно для чотирьох і більше джерел сигналів. Дакі осцилографи називались багатоканальними.

На зміну шлейфовим осцилографам прийшли електронні на основі електронно-променевих трубок. За принципом роботи вони є аналогові, тобто відображали безперервний за амплітудою сигнал. В свою чергу вони поділялись на аналогові за часом та стробоскопічні.

Аналогові осцилографи відображають сигнали без розривів у часі та амплітуді.

Стробоскопічні осцилографи використовують відліки сигналів у певні проміжки часу з яких синтезується дискретне зображення періодичного сигналу. Наприклад, на першому періоді осцилограф заносить до аналогової пам'яті відлік сигналу №1 в момент часу t_1 . На другому періоді осцилограф заносить до аналогової пам'яті відлік сигналу №2 в момент часу t_2 . І так далі з урахуванням доступного числа комірок аналогової пам'яті. Тобто, для заповнення N комірок аналогової пам'яті вибірками сигналу буде використано N періодів сигналу. Вважається, що всі періоди сигналу однакові в межах точності осцилографу. Сигнал відображається безперервним за амплітудою та дискретно за часом з використанням блоку зчитування вибірок дискретної аналогової пам'яті та відтворення зображення на екрані електронно-променевої трубки. Такий підхід дозволяє значно розширити межі частоти досліджуваного сигналу.

Наступна категорія аналогових осцилографів – це осцилографи, що запам'ятовують. В якості аналогової пам'яті слугує екран електронно-променевої трубки. Електронним променем формується рельєф зображення, який можливо спостерігати визначений час.

Сучасні цифрові осцилографи, наприклад, серії DSOX 1102 [7-8], рис.11, в своїй архітектурі містять аналого-цифровий перетворювач, цифрову пам'ять, дисплей та процесор, що налаштований на керування роботою та обробкою отриманих даних: вимірювання та аналізу.

Функціональні можливості вказаного осцилографу відображені в [7-8]. На рис. 11 цифрами позначено основні органи керування:

1 – Кнопка «Включити-Виключити» прилад.

2 – Гніздо USB для підключення флеш-карти для запису результатів дослідження

3 – Виводи для спостереження демо-сигналів: зразків тих сигналів, що продукує внутрішній генератор тестових напруг.

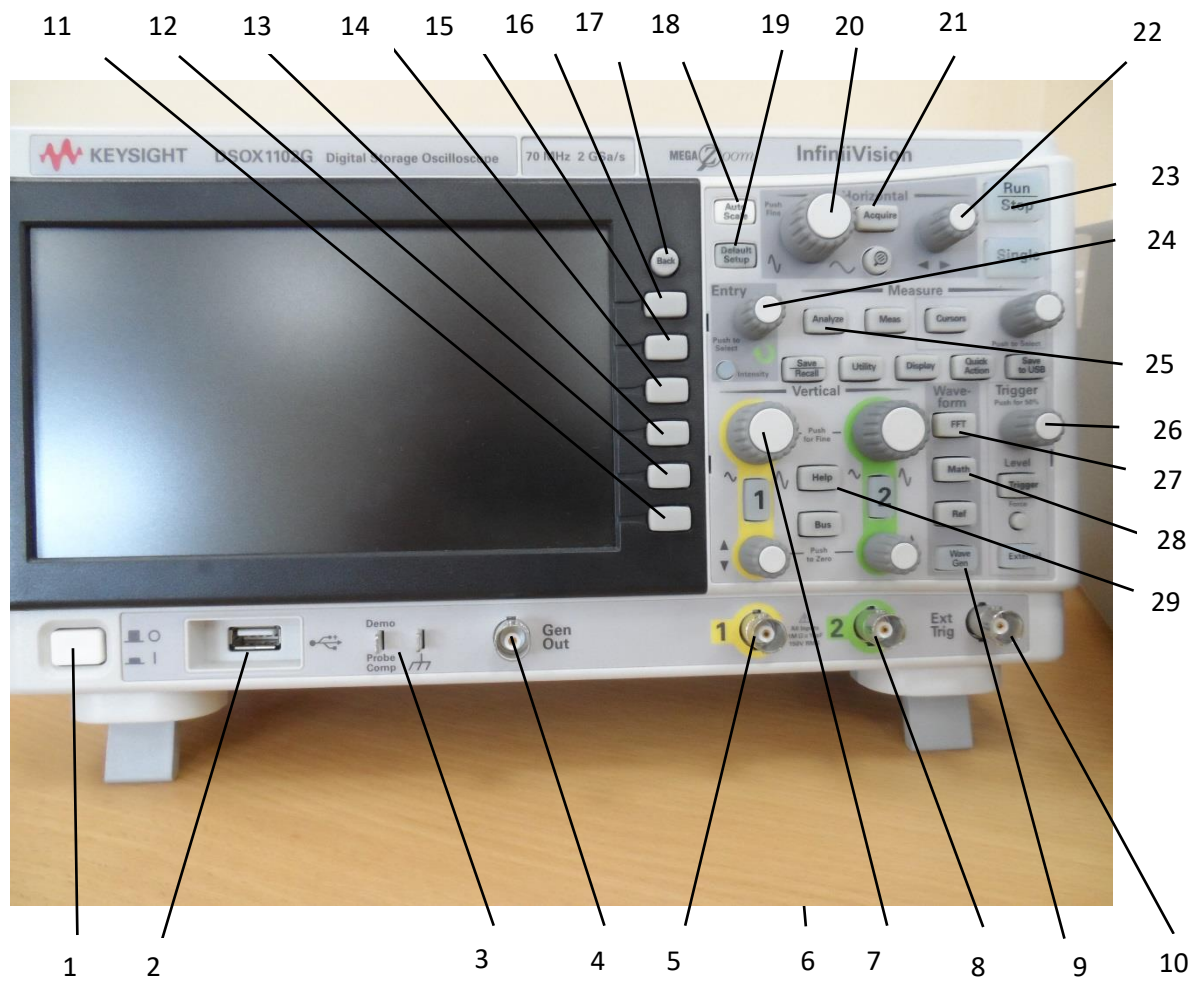


Рис. 11. Органи керування осцилографом

- 4 – Вихід того ж генератора “Gen Out”, з якого сигнал отримується з тими параметрами, що активні на цей час в меню генератора
- 5 – Вхід першого каналу осцилографа, який відображає сигнал жовтим кольором
- 6 – Ручка ручної установки рівня зображення «Вище-Нижче»
- 7 – Ручка ручної установки посилення першого каналу
- 8 – Вхід другого каналу осцилографа, який відображає сигнал зеленим кольором
- 9 – Включити-Відключити сигнал на виході генератора “Gen Out”
- 10 – Вхід синхронізації від зовнішнього джерела
- 11-16 – Кнопки меню поточного режиму роботи
- 17 – Повернення на виконання сервісу

- 18 – Включення режиму з автоматичною установкою масштабування зображення
 - 19 – Повернення до базових установок режиму роботи за замовчуванням
 - 20 – Регулювання масштабу за часом
 - 21 – Режим відображення зображення
 - 22 – Ліворуч-Праворуч
 - 23 – Пуск-Стоп
 - 24 – Регулювання рівня вхідного сигналу, що вибраний в меню
 - 25 – Вибір аналізу амплітудно-частотної характеристики
 - 26 – Регулювання рівня сигналу синхронізації
 - 27 – Вибрати швидке перетворення Фур'є
 - 28 – Вибрати математичну обробку результатів
 - 29 – «Допомога» - Виклик інструкції користувача та підключення сигналів на вихід "Demo"
- Більше можливостей у цифрових осцилографів серії 2000 X [9],
рис.12,

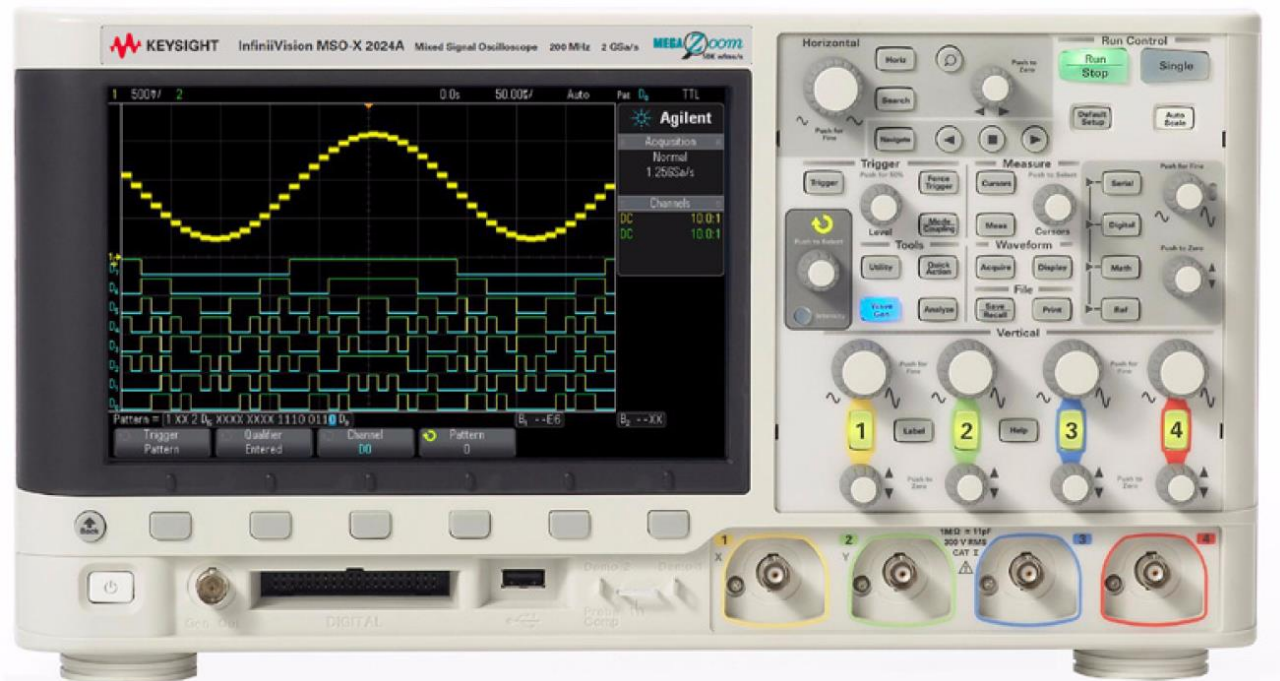


Рис.12. Осцилограф серії 2000 X з підвищеними функціональними можливостями

Вони за принципом роботи подібні до осцилографів серії 1000 X, тому окремо розглядатися не будуть. Для тих, хто бажає про них дізнатись більше, може звернутись до докладної інструкції користувача [9].

Вивчення таких приладів виходить за межі даного видання. Але знати про наявність таких приладів важливо з точки зору вивчення метрології.

При роботі з будь-якими приладами і, звичайно, осцилографами також, важливо дотримуватись правил техніки безпеки при роботі з обладнанням, що живиться від мережі 220 В.

. Повернемося до осцилографа серії 1000X. Надалі матеріал з теми «Осцилограф» викладається з використанням джерела [8].

Для проведення будь-яких операцій з сигналами потрібно скористатись пробниками Рис.13., що підключаються до входів

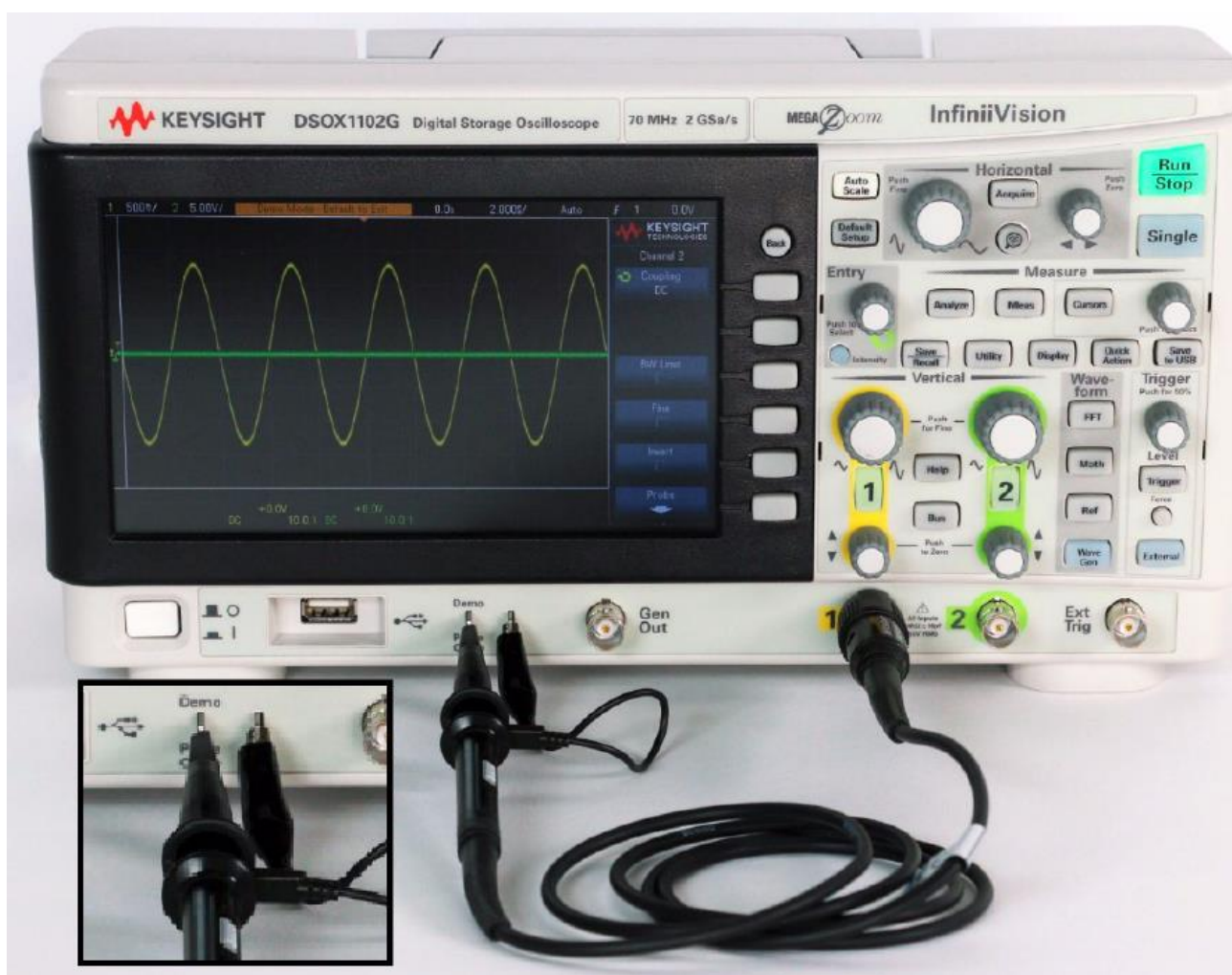


Рис. 13. Підключення пробника до входу каналу 1 і вихідного контакту

осцилографа. Розглянемо найголовнішу функціональну можливість осцилографа – дослідження періодичного сигналу. В даному випадку – синусоїдального сигналу: напруги внутрішнього генератора.

8.2. Дослідження періодичного сигналу

Для початку роботи необхідно підключити прилад до мережі 220 В за допомогою кабелю живлення, що обладнаний контактом до заземлення. Перевірити пробники – кабелі для підключення вузла схеми, що досліджується, до входу осцилографа. Для цього пересвідчитись, що перемикач подільника вхідного сигналу встановлено в потрібне значення: для сигналу до 10 В має бути 1:1, для сигналу, що перевищує рівень 0 В перемикач потрібно встановити в положення 1:10. Зрозуміло, що рівень вхідного сигналу цього разу не повинен перевищити 100 В. Саме для першого кроку дослідження навчального сигналу пробники мають бути встановлені на позначку 1:1

1. Натисніть на кнопку 1 «Включити-Виключити» прилад. Осцилограф включиться, пройде перевірочні тести самоконтролю.
2. Підключіть перший пробник осцилографа до входу BNC каналу 1 і вихідного контакту з підписом "Demo" (Демонстрація), як показано на Рис. 3. Підключіть затискач заземлення пробника до центрального контакту (Заземлення).
4. Поруч від правої верхньої області на лицьовій панелі натисніть кнопку [Default Setup] «Налаштування за замовчуванням».

При виборі «Налаштування за замовчуванням» на осцилографі буде відновлена заводська конфігурація. Відновляться не тільки коефіцієнти масштабування по осях X і Y, а й будуть відключені всі особливі режими роботи, які, можливо, використовувалися раніше.

3. На лицьовій панелі натисніть кнопку 29 [Help] Довідка (поруч з поруч з елементами управління по вертикалі каналу 2).

4. Натисніть програмну кнопку «Додати» сигнали, розташовану праворуч від дисплея осцилографа.
5. Натисніть програмну кнопку «Учбові сигнали» для відображення меню, використовуючи ручку «Введення» 24, виберіть сигнал «Синусоїда» (у верхній частині списку), потім натисніть програмну кнопку «Вивід» для включення. Тепер на контакті "Demo" (Демонстрація) повинна бути синусоїдальна хвиля, але визначити її при коефіцієнтах масштабування за умовчанням неможливо. Тепер налаштуємо параметри по осях, щоб розширити і відцентрувати криву на дисплеї.
6. Крутіть ручку В / поділ каналу 1 за годинниковою стрілкою, поки крива не займатиме більше $\frac{1}{2}$ екрану. Правильна настройка повинна скласти 500 мВ / поділ, що видно за значенням "500 мВ /" в лівому верхньому кутку дисплея.
7. Поверніть ручку 20 с / поділ (велика ручка в області "Коеф.розгортки") за годинниковою стрілкою так, щоб на дисплеї відображався більше двох періодів синусоїдальної хвилі. Правильна настройка повинна скласти 1,000 мкс / справ, що видно за значенням "1,000 мкс /" в центрі верхньої частини дисплея. Вид на дисплеї осцилографа тепер повинен відповідати Рис. 4. Далі ці значення будемо називати налаштуванням (настройкою) тимчасової розгортки осцилографа.
8. Поверніть ручку положення коефіцієнта розгортки, щоб перемістити криву вліво або вправо.
9. Натисніть цю ручку, щоб скинути значення до нуля (0,0 секунд по центру екрану).
10. Поверніть ручку 6 положення каналу 1 по вертикалі, щоб перемістити криву вгору і вниз. Зверніть увагу, що індикатор заземлення зліва теж переміщається. Він позначає положення 0,0 Вольт (рівень заземлення) цієї кривої, Рис.14.

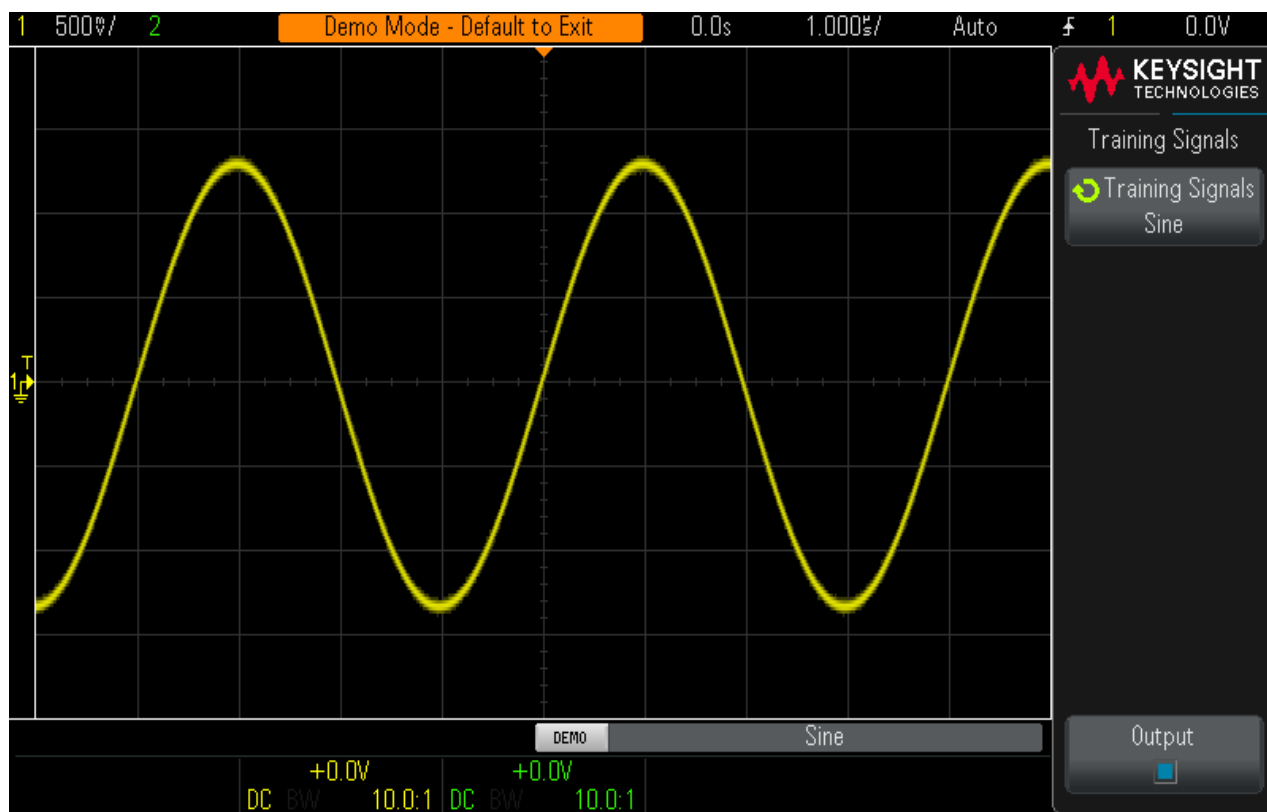


Рис. 14. Початкова настройка для перегляду навчального сигналу
синусоїдальної хвилі

Натисніть ручку положення каналу 1 по вертикалі, щоб заземлення (0,0 V) знову знаходилося по центру екрана. Тепер виконаємо кілька вимірів для повторюваної синусоїдальної хвилі. Зверніть увагу, що зображення на осцилографі по суті являє собою графік залежності Y від X . По осі X (по горизонтальній) відкладається час, по осі Y (по вертикальній) - напруга. На багатьох курсах з електротехніки та фізики вам, ймовірно, вже доводилося розраховувати і малювати електричні сигнали в схожому вигляді на папері. Або, можливо, ви працювали з програмним забезпеченням ПК для автоматичної побудови кривих сигналів. Якщо на осцилограф надходить вхідний сигнал, що повторюється, то можна спостерігати його динамічно (безперервно оновлюється) у вигляді кривих на дисплеї.

Осі X поділені на 10 основних поділів, значення яких залежать від настройки сек / поділ. В даному випадку кожне основний поділ по горизонталі відповідає 1 мікросекунди, бо встановлена тимчасова розгортка осцилографа 1,000 мкс / поділ, як було зазначено раніше. Так як на екрані по горизонталі 10 поділок, то осцилограф показує відрізок часу 10 мкс (1,000 мкс / справ x 10 поділок) зліва направо. Кожен основний відрізок розділений на 4 менших відрізків штриховими мітками на горизонтальних осях по центру. Кожне мале поділення в нашому випадку відповідає $1/4 \text{ справ} \times 1 \text{ мкс} / \text{справ} = 250 \text{ нс}$.

Ось Y складається з 8 основних відрізків по вертикалі, кожен основний відрізок відповідає настройці В / поділ, для якої має бути встановлено значення 500 мВ / справ. При використанні цього значення осцилограф може вимірювати сигнали до 4 В парного імпульсу (500 мВ / справ x 8 ступенів). кожен основний відрізок розділений на 5 малих. Кожне мале поділення у вигляді штриховий мітки на вертикальних осях по центру відповідає 100 мВ.

12. Визначте період (Т) однієї з синусоїдальних хвиль, порахувавши число поділок (Основних і малих) від значення 0,0 В одного переднього фронту (по центру екрану) до 0,0 наступного, а потім помноживши отримане значення на настройку с / справ (1,000 мкс / справ в даному випадку).

13. Частота цієї синусоїдальної хвилі $F = 1 / T$. Тепер визначимо значення повної амплітуди напруги для цієї синусоїдальної хвилі, але спочатку трохи змінимо налаштування по вертикалі, щоб виконати вимір більш точно.

14. Крутіть ручку положення каналу 1 по вертикалі (маленька ручка під підсвічується кнопкою "1"), поки негативні піки синусоїдальних хвиль не перетинатимуть одну з основних ліній координатної сітки (або ліній сітки).

15. Далі крутите ручку положення коефіцієнта розгортки (маленька ручка нагорі лицьової панелі), поки один з позитивних піків синусоїдальних хвиль не перетне вертикальну вісь по центру екрана зі штриховими мітками малих поділок.

16. І ось тепер розрахуйте повну амплітуду напруги хвилі, склавши число поділів (основних і малих) від негативного до позитивного піку і помноживши отримане значення на настройку В / справ (500 мВ / справ в даному випадку).

Тепер, використовуючи функцію курсора, виконаємо ці ж вимірювання напруги і часу, але вже без підрахунку поділів і множення їх на коефіцієнти масштабування. На лицьовій панелі в області [Measure] Вимірювання знайдіть ручку [Cursors] Курсори (див. Рис. 15).

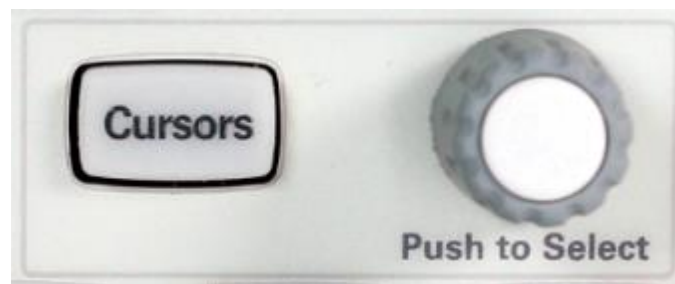


Рис. 15. Органи керування курсорами на екрані

17. Натисніть ручку [Cursors] Курсори, потім поверніть її та виберіть "X1";

далі знову натисніть ручку для вибору (якщо після переходу до курсора X1 не натискати її вдруге, то через деякий час курсор X1 буде обраний автоматично і меню закриється).

18. Крутите ручку [Cursors] Курсори, поки курсор X1 (маркер часу № 1) не перетне передній фронт синусоїдальної хвилі в місці з потрібним рівнем напруги. Порада. Зіставте курсор з точкою на кривій, там де вона перетинає одну з горизонтальних ліній сітки.

19. Знову натисніть ручку [Cursors] Курсори, потім поверніть її та виберіть "X2"; натисніть ручку ще раз для вибору.

20. Крутіть ручку [Cursors] Курсори, поки курсор X2 (маркер часу № 2) не перетне наступний передній фронт синусоїдальної хвилі в місці з тим же рівнем напруги.
21. Знову натисніть ручку [Cursors] Курсори, потім поверніть її та виберіть "Y1"; натисніть ручку ще раз для вибору, Рис.16.
22. Крутіть ручку [Cursors] Курсори, поки курсор Y1 (маркер напруги №1) не перетне негативні піки синусоїдальних хвиль.
23. Знову натисніть ручку [Cursors] Курсори, потім поверніть її та виберіть "Y2"; натисніть ручку ще раз для вибору.
24. Крутіть ручку [Cursors] Курсори, поки курсор Y2 (маркер напруги № 2) не перетне позитивні піки синусоїдальних хвиль.
25. Визначте період, частоту і повну амплітуду напруги цього сигналу (Висновок даних курсорів на правій стороні дисплея). Найпоширеніший метод для вимірювання часу і напруги – це метод підрахунку поділок на осцилографі, який ми використовували першим

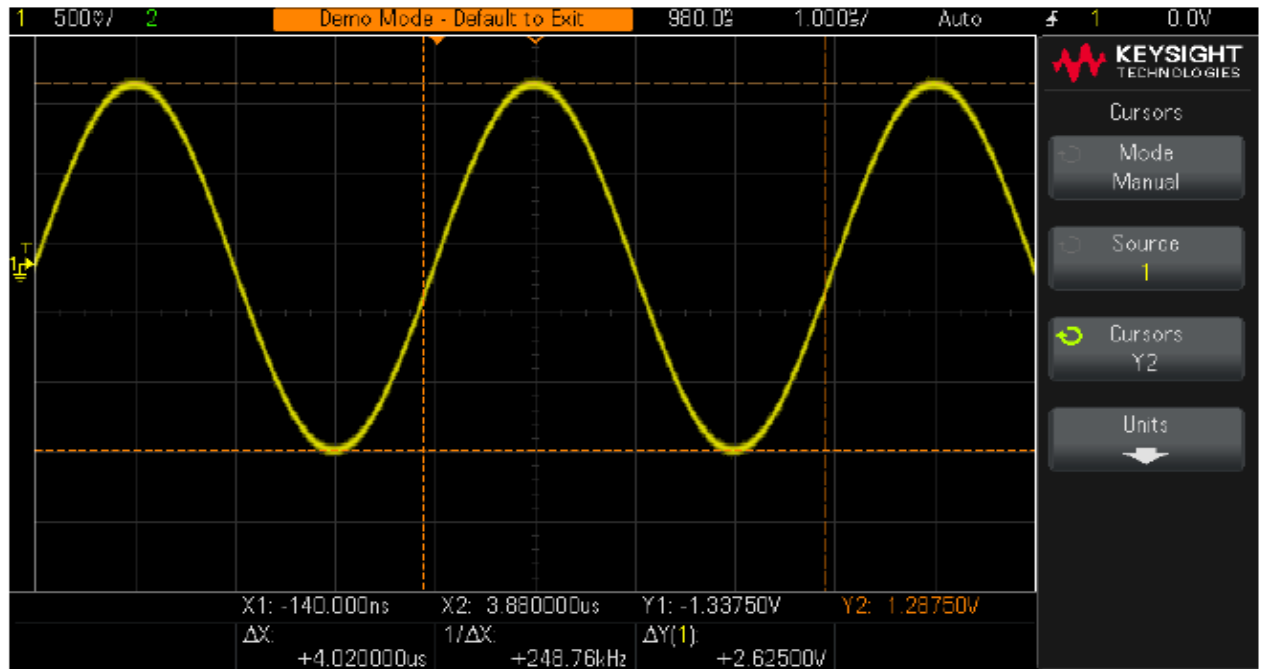


Рис. 16. Вимірювання напруги за допомогою курсорів на екрані

. Незважаючи на те, що в загальному випадку необхідно вважати ділення і множити їх на настройки осцилографа, фахівці, добре

знайомі з приладами, можуть швидко оцінити напругу і час сигналів ... а іноді і побіжно визначити правильний і неправильний сигнал.

За допомогою курсорів можна проводити вимірювання трохи точніше і не будуючи припущень. Більшість сучасних осцилографів можуть проводити автоматичні вимірювання параметрів ще точніше і швидше.

8.3. Основи синхронізації цифрового осцилографа

Синхронізація (або запуск) осцилографа - це, можливо, найбільш важлива його особливість, яку необхідно знати для ефективного проведення вимірювань. Це особливо важливо при вимірах безлічі сучасних складних цифрових сигналів. На жаль, синхронізація часто залишається незрозумілою.

Синхронізацію осцилографа можна порівняти з синхронізованою фотозйомкою. У вхідному сигналі, що може періодично повторюватися або промайнути лише одного разу, зображення реєструється і виводиться осцилографом на екран. Там, при періодичному повторюванні, можуть бути тисячі зображень в секунду. Щоб спостерігати за такими сигналами (або фотографіями), фотозйомку необхідно з чимось синхронізувати. За точку синхронізації приймається певний момент часу у вхідному сигналі або час на основі комбінації логічного типу в цих сигналах (синхронізація за логічним шаблоном) при використанні декількох каналів в осцилографі.

Синхронізацію осцилографа можна порівняти з фотофінішем на спортивних змаганнях – на перегонах коней. Незважаючи на те, що ця подія не повторюється,, затвор фотоапарата повинен бути синхронізований з моментом, коли ніс лідируючого коня перетинає лінію фінішу. Випадкова фотозйомка скачок між стартом і фінішем аналогічна перегляду несинхронізованих кривих на осцилографі. Щоб краще зрозуміти синхронізацію осцилографа, виконаємо кілька

вимірювань синусоїдальної хвилі, вже знайомої з попереднього розділу.

1. Переконайтеся, що пробник осцилографа все ще підключений до контакту з підписом "Demo" (Демонстрація) і входу BNC каналу 1.
2. На лицьовій панелі осцилографа натисніть клавішу [Default Setup] Налаштування за замовчуванням.
3. Натисніть кнопку 29 [Help] Довідка, потім натисніть програмну кнопку Додати сигнали.
4. За допомогою ручки 24 «Введення» виберіть навчальний сигнал Синусоїда, потім натисніть програмну кнопку Вивести для його включення.
5. Встановіть значення В / поділ телеканалу 1 500 мВ / поділ.
6. Встановіть для тимчасової розгортки осцилографа значення 1,000 мкс / поділ.
7. На лицьовій панелі натисніть кнопку [Trigger] Тригер.
8. Натисніть програмну кнопку Тип запуску.

Зображення на дисплеї осцилографа тепер має бути схожим на те, що показано на Рис. 17. За умов запуску осцилографа за замовчуванням,



Рис.17. Синхронізація осцилографа з переднім фронтом каналу 1 при 0,0 Вольт

він запускається по (синхронізується) відповідно до переднього (згідно з вибором відхилення) фронту (згідно з вибором типу запуску) синусоїдальної хвилі, яка вимірюється і реєструється за допомогою каналу 1 (згідно з вибором джерела), коли крива сигналу перетинає рівень 0,0 В (згідно налаштування рівня запуску). Цей момент часу знаходиться по центру екрану в місці перетину осей, якщо положення по горизонталі дорівнює 0,0 сек (за замовчуванням). Дані форми сигналу, зареєстровані до точки запуску (на лівій частині дисплея), вважаються даними негативного часу, а дані форми сигналу, зареєстровані після точки (на правій частині дисплея), – даними позитивного часу.

Зафарбований помаранчевий трикутник у верхній частині дисплея позначає розташування моментів часу запуску (0,0 с). При зміні затримки / положення по горизонталі він зміщується щодо центру. Зафарбований помаранчевий трикутник по центру екрана (з'являється при затримці / положенні не рівним 0,0 с) позначає час затримки при використанні точки відліку за замовчуванням.

9. Поверніть ручку рівня запуску за годинниковою стрілкою, щоб збільшити значення напруги рівня запуску.

10. Поверніть ручку рівня запуску проти годинникової стрілки, щоб зменшити значення напруги рівня запуску. Після збільшення значення напруги рівня запуску синусоїдальна хвиля зміщується по осі X вліво. Після зменшення - хвиля зміщується вправо. При повороті ручки рівня запуску з'являється помаранчевий індикатор рівня запуску по горизонталі, а в правому верхньому куті дисплея - точне значення напруги запуску. Після повороту ручки цей індикатор через кілька секунд пропаде з екрану. Замість нього зліва, за межами координатної сітки кривої, з'явиться жовтий індикатор рівня запуску, який позначає рівень запуску відносно кривої.

11. Поверніть ручку рівня запуску, щоб встановити рівень запуску 500 мВ (1 поділ вище центру екрану). Точне значення рівня запуску відображається в верхньому правому куті екрану.

12. Натисніть програмну кнопку Відхилення і виберіть умова запуску фронту Задній. Синусоїдальна хвиля "перевернеться" на 180 градусів і задній фронт кривої буде синхронізований по центру екрана, як показано на Рис. 18.

13. Збільшуйте значення напруги рівня запуску, поки помаранчевий індикатор рівня не буде знаходитися вище позитивних піків синусоїдальної хвилі (Приблизно на +1,5 В). Якщо рівень запуску знаходиться вище кривої, то збір даних і зображення (Повторюється зйомка) вже не синхронізовані з вхідним сигналом, так як при цьому рівні запуску відсутні перетину фронтів. зображення на дисплеї осцилографа тепер має бути схожим на те, що показано на Рис. 19. Тепер осцилограф знаходиться в режимі автоматичного запуску.



Рис. 18. Запуск по задньому фронту синусоїдальної хвилі при +500 мВ

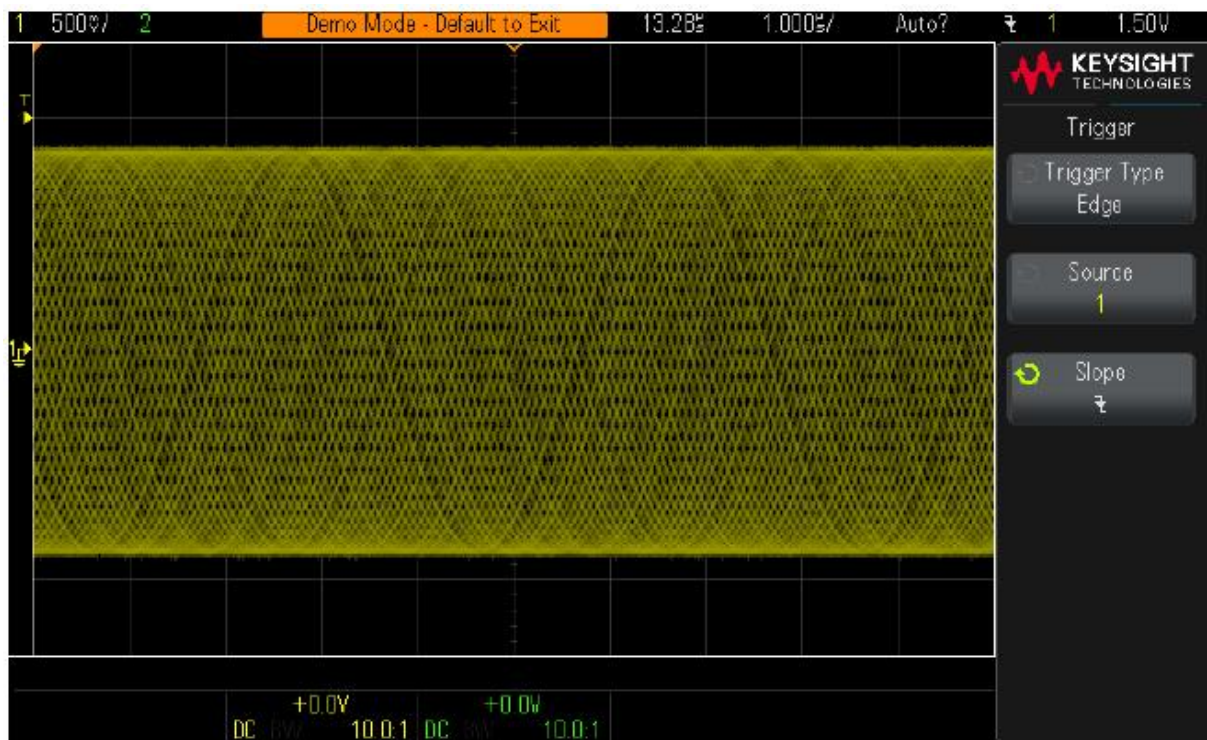


Рис. 19. Автоматичний запуск з рівнем вище вхідного сигналу

Режим Автозапуск є режимом осцилографа за замовчуванням.

Але якщо осцилограф знаходиться в режимі Автозапуск і він не виявив підходящої умови запуску (в нашому випадку - перетину фронту синусоїдальної хвилі) протягом певного часу (він може бути різним і залежить від налаштування тимчасової розгортки), то прилад створює власний асинхронний запуск і починає зйомку (збір даних) вхідного сигналу в випадкові моменти часу. Так як зйомка виконується випадковим чином (не синхронізована з вхідним сигналом), то криві на екрані розмиті. Розмиття зображення якраз свідчить про те, що осцилограф не виконує запуск по вхідному сигналу.

14. Щоб автоматично встановити рівень запуску на приблизно 50%, натисніть ручку рівня запуску.

15. Від'єднайте пробник каналу 1 від контакту "Demo" (Демонстрація). Тепер ми повинні бачити сигнал постійного струму базового рівня 0,0 В. Так як з сигналом постійного струму 0,0 В перетину фронтів відсутні і, отже, осцилограф ні з чим синхронізувати, то включиться

автоматичний запуск, при якому сигнал рівня постійного струму почне виводитися на екран.

Крім режиму Автозапуск, користувач може вибрати, чи запускати Нормальний. Розглянемо відмінності між режимами запуску Нормальний і Автозапуск.

16. Підключіть пробник каналу 1 до контакту "Demo" (Демонстрація). Тепер синхронізована синусоїдальна хвиля знову відображається на екрані.

17. На лицьовій панелі натисніть клавішу [Trigger] Тригер, потім натисніть програмну кнопку Режим.

18. Поверніть ручку 24 введення, щоб переключити режим запуску з Авто на Нормальний. На даному етапі виводяться сигнали повинні бути однаковими.

19. Знову від'єднайте пробник каналу 1 від контакту "Demo" (Демонстрація). Тепер можна бачити останню вибірку (останнє зображення) перед відключенням пробника. На дисплеї відсутня крива рівня постійного струму 0,0 В, яка відображалася в режимі Автозапуск. У режимі Нормальний запуск осцилограф відображає криві тільки якщо він виявив підходящі умови запуску (в даному випадку перетину фронтів).

20. Поверніть ручку запуску за годинниковою стрілкою, щоб задати рівень запуску +1,50 В (тобто вище вимірюваної синусоїдальної хвилі).

21. Підключіть пробник каналу 1 до контакту "Demo" (Демонстрація). Сигнал синусоїдальної хвилі тепер надходить в осцилограф, але де ж циклічна крива? Так як включений режим запуску Нормальний, то осцилографа потрібні справжні перетину фронтів. Але рівень запуску заданий вище кривої (+1,50 В) і перетину відсутні. Ясно, що в режимі запуску Нормальний крива не знайдено і значення постійного струму виміряти не можливо.

22. Щоб автоматично приблизно встановити рівень запуску на 50%, натисніть ручку рівня запуску. На осцилографі повинні знову з'явитися повторювані криві.

У деяких осцилографах старих моделей режим запуску Нормальний називається режимом Ініційований. Ця назва краще характеризує такий режим, так як в ньому осцилограф запускається тільки при виконанні відповідної умови запуску і він не використовує автоматичного запуску (Асинхронний запуск для проведення асинхронної зйомки). режим запуску Нормальний не відповідає прямим змістом слова "нормальний", тому що не є режимом запуску осцилографа за замовчуванням. зазвичай використовується режим запуску Авто, який і є режимом запуску за замовчуванням. На цьому етапі у може виникнути питання щодо використання режиму запуску Нормальний. Режим запуску Нормальний слід використовувати тоді, коли подія запуску відбувається вкрай рідко (наприклад, при одноразовій події). Детальніше, якщо, осцилограф налаштований на відображення дуже вузького пульсу, який проявляється з частотою 1 Гц (один раз в секунду) і перебуває в режимі запуску Авто, то приладу доведеться генерувати безліч асинхронних автоматичних запусків і він не зможе відобразити такий пульс. У такій ситуації краще вибрати режим запуску Нормальний, в якому осцилограф, перш ніж відображати криві, очікує виникнення відповідної події запуску. Зараз розглянемо включення при сигналах з високим рівнем шуму.

8.4. Реєстрація та збереження результатів тестів осцилографа

Після завершення робіт по вивченню різних ланцюгів може виникнути потреба скласти звіт чи протокол випробування. У звіт по виконаній роботі може знадобитися вставити зображення (малюнки) з вимірюваннями. Крім того, одного сеансу може виявитися недостатньо для виконання всієї запланованої роботи. Бажано продовжити роботу з

того місця де вона була перервана, без переналаштування осцилографа або сигналів. В даному розділі викладено, як зберегти і відкрити файли осцилографа різних типів, наприклад, зображення, опорні сигнали і настройки. У цієї роботи буде потрібен персональний USB-накопичувач.

1. Переконайтеся, що пробник осцилографа все ще підключений до контакту з підписом "Demo" (Демонстрація) і входу BNC каналу 1.
2. На лицьовій панелі осцилографа натисніть клавішу [Default Setup] «Налаштування за замовчуванням».
3. Натисніть кнопку [Help] «Довідка», потім натисніть програмну кнопку Додати сигнали.
4. За допомогою ручки 24 введення виберіть сигнал Синусоїда, потім натисніть програмну кнопку Виведення для його включення.
5. Встановіть значення В / поділ каналу 1 500 мВ / поділ.
6. Встановіть для тимчасової розгортки осцилографа значення 2 мкс / поділ. На екрані осцилографа повинні відображатися п'ять циклів синусоїдальної хвилі, як показано на Рис. 20.

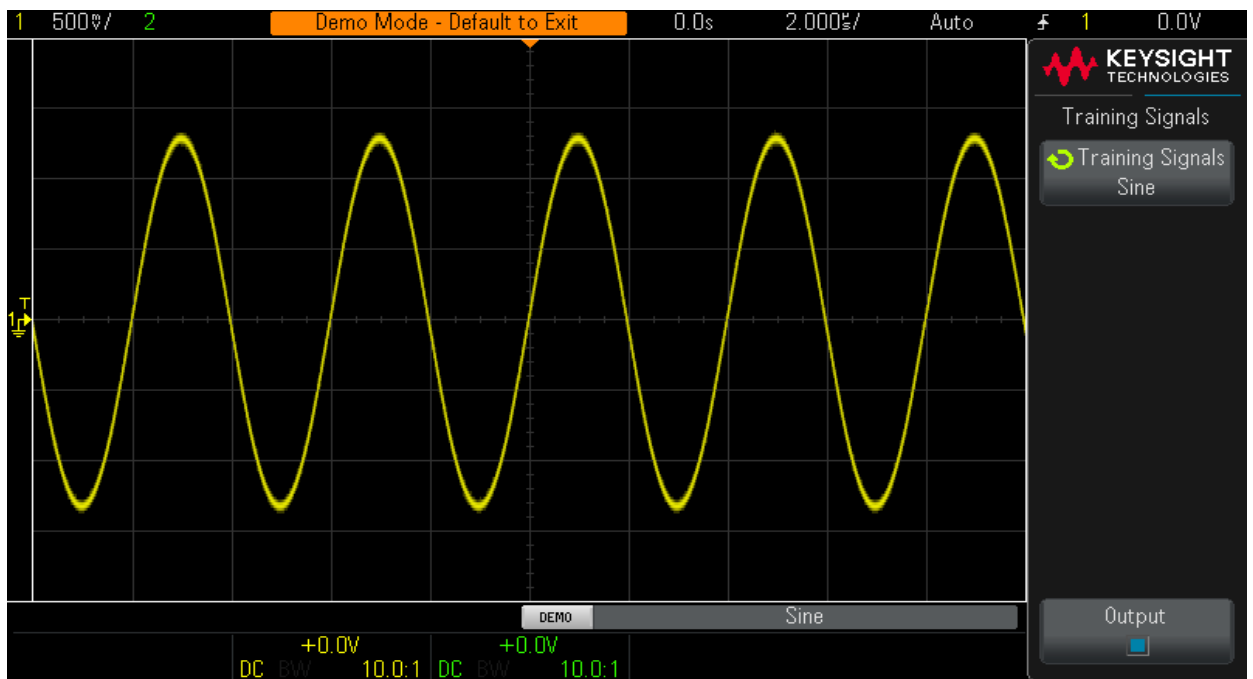


Рис. 20. П'ять періодів синусоїдальної хвилі, які потрібно зберегти для подальшого аналізу

Тепер збережемо зображення (малюнок), сигнал і настройку.

7. Вставте персональне USB-накопичувач в порт USB на лицьовій панелі осцилографа.

8. На лицьовій панелі під ручкою [Cursors] Курсори в секції [File] Файл натисніть кнопку [Save / Recall] Представляти / відновити.

9. Натисніть програмну кнопку Зберегти, потім Формат.

10. За допомогою ручки введення, виберіть зображення PNG 24 біта (*.png).

11. Натисніть програмну кнопку Зберегти в (або Натиснути для переходу), потім з допомогою ручки введення виберіть \usb.

12. Натисніть програмну кнопку Файл, потім поверніть ручку введення і задайте цього файлу ім'я. Виберіть ім'я test.

13. При повороті універсальної ручки введення з'явиться рядок з літерами і цифрами. Виберіть першу літеру імені, в нашому випадку "t" і натисніть програмну кнопку введення або ручку введення.

14. Повторіть крок № 13 для кожного символу в імені файлу.

15. Щоб видалити всі залишилися символи від стандартної назви, натисніть програмну кнопку «Видалити».

16. Натисніть програмну кнопку Приріст, щоб відключити автоматичний приріст (поле повинно бути чорного кольору). якщо автоматичний приріст включено, то номер, пов'язаний з ім'ям файлу, автоматично збільшиться. Приріст потрібно для збереження безлічі зображень, щоб не вводити вручну імена файлів.

17. Натисніть програмну кнопку «Натисніть для збереження». У USB-накопичувачі має зберегтися таке ж зображення, як на Рис. 9. Файл - test.png. Переконайтеся в наявності файлу можна, якщо відкрити його або вставити в документ Microsoft-Word. Тепер збережемо конфігурацію налаштувань осцилографа.

18. На лицьовій панелі натисніть клавішу [Save / Recall] «Зберігати / Відновити».

19. Натисніть програмну кнопку «Зберегти», потім «Формат».
20. За допомогою ручки 24 «Введення» виберіть «Налаштування» (* .scr).
21. Натисніть програмну кнопку «Зберегти в» (або «Натиснути для переходу» або «Місце»).
22. За допомогою ручки 24 «Введення» перейдіть до \ usb, потім натисніть ручку 24 «Введення».
23. Натисніть програмну кнопку «Файл». Як можна бачити, раніше введене ім'я файлу стало ім'ям за умовчанням. Так як формат файлу настройки має інше розширення, то можна використовувати це ж ім'я файлу.
24. Натисніть програмну кнопку «Натисніть для збереження».
Зараз в USB-накопичувачі повинен зберігатися файл test.scr з поточною конфігурацією налаштувань осцилографа. Його ми відкриємо пізніше. Зверніть увагу, що можна зберегти настройки в один з регістрів внутрішньої флеш-пам'яті. Однак вміст регістрів може бути перезаписано іншим користувачем. Тому студентам рекомендується при роботі на осцилографі загального користування зберігати налаштування і сигнали на персональному запам'ятовуючому пристрою. Тепер збережемо файл даних контрольної форми сигналу.
25. На лицьовій панелі натисніть клавішу [Save / Recall] «Представляти / відновити».
26. Натисніть програмну кнопку «Зберегти», потім «Формат».
27. За допомогою ручки 24 «Введення» виберіть «Файл даних контрольної форми сигналу» (* .H5).
28. Натисніть програмну кнопку «Зберегти в» (або «Натиснути для переходу»).
29. За допомогою ручки 24 «Введення» перейдіть до \ usb, потім натисніть ручку 24 «Введення».

30. Натисніть програмну кнопку Файл. Змінювати ім'я файлу не потрібно, тому що розширення файлу унікально (test.h5).

31. Натисніть програмну кнопку «Натисніть для збереження».

Зверніть увагу, що раніше збережений тип файлу .png був точковим знімком дисплея осцилографа. Файли цього типу неможливо відкрити на осцилографі, як і виконати вимірювання даних, збережених в такому файлі. Цей тип разом з .bmp використовується головним чином для документації, наприклад, в якості додатки до звітів з лабораторної роботи. У файлі даних «Reference Waveform» (Контрольна форма сигналу) (.h5), який тільки що збережений, зберігаються дані у вигляді пар напруга-час. Файл цього типу можна відкрити в осцилографі для подальшого аналізу. Його можна відкрити в багатьох додатках ПК для більш глибокого аналізу в автономному режимі.

Через те, що конфігурація налаштувань осцилографа і сигнал (4 циклу синусоїдальної кривої) вже збережені, то давайте відкриємо ці файли. Але спочатку завантажимо настройки за замовчуванням, щоб стерти поточні налаштування і криву на екрані.

32. Натисніть [Default Setup] «Налаштування за замовчуванням» і від'єднайте пробник каналу 1 від контакту "Demo" (Демонстрація).

33. Натисніть [Save / Recall] Представляти / відновити.

34. Натисніть програмну кнопку Виклик, потім наступну програмну кнопку Виклик.

35. За допомогою ручки 24 «Введення» виберіть Налаштування в якості типу відкривається файлу.

36. Натисніть програмну кнопку Місце (або Натиснути для переходу або Завантажити з), потім за допомогою ручки введення виберіть тест.

37. Натисніть програмну кнопку Натиснути для відновлення або ручку 24 «Введення». В осцилографі відновлені колишні налаштування. Однак стан навчальних сигналів НЕ збережено в осцилографі. В даний момент на екрані відображається тільки сигнал базового рівня (0,0 В),

бо на входах пробників сигнали відсутні. Тепер відкриємо сигнал, який був раніше збережений.

38. Натисніть програмну кнопку Виклик, потім за допомогою ручки введення виберіть «Дані контрольної форми сигналу (* .h5)».

39. Натисніть програмну кнопку «Завантажити з» (або «Натиснути для переходу» або «Місце»), потім за допомогою ручки введення виберіть тест.

40. Натисніть програмну кнопку «Натиснути для відновлення» або ручку введення. Тепер при конфігурації попередніх налаштувань на екрані повинна відобразитися збережена синусоїдальна хвиля (разом з поточним сигналом базового рівня 0,0 В) (див. Рис. 21). Тепер можна змінити налаштування і продовжити вимірювання збереженої кривої. USB-накопичувач можна витягти відразу після збереження / виклику даних.

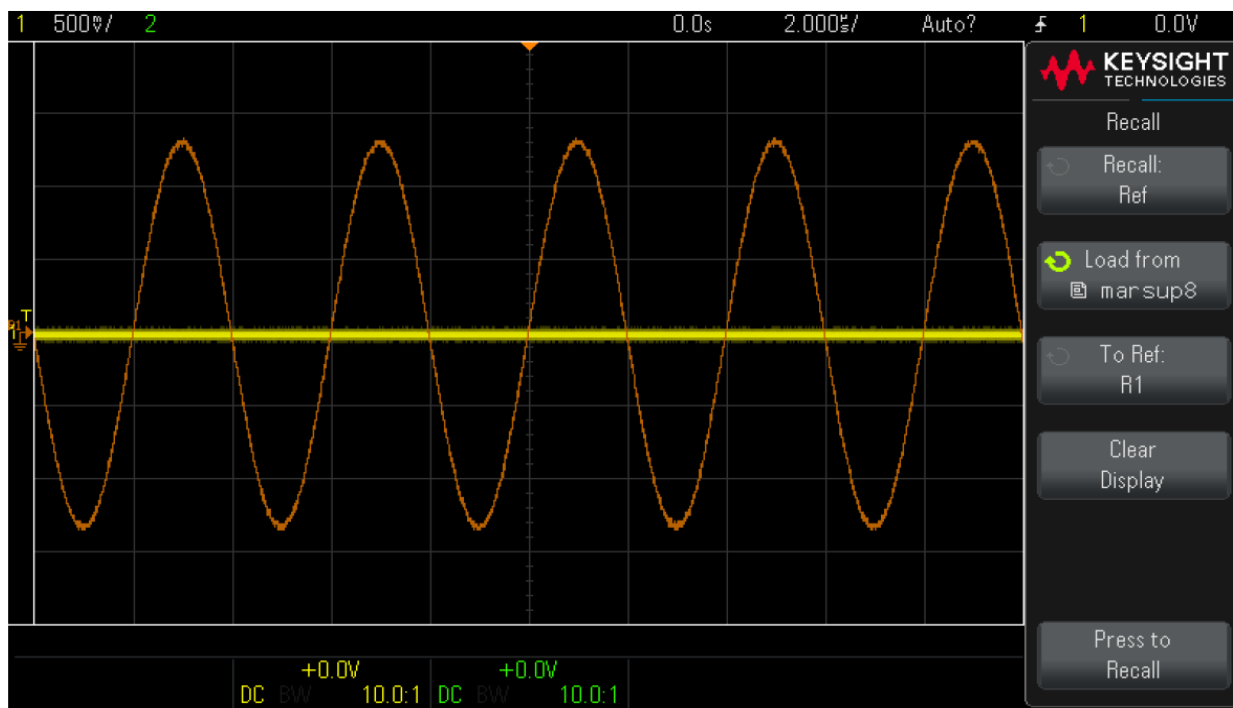


Рис. 21. Вид на екрані після виклику конфігурації налаштувань осцилографа і сигналу

8.5. Компенсація пасивних пробників 10: 1

На Рис. 22 показана електрична модель пробника і осцилографа

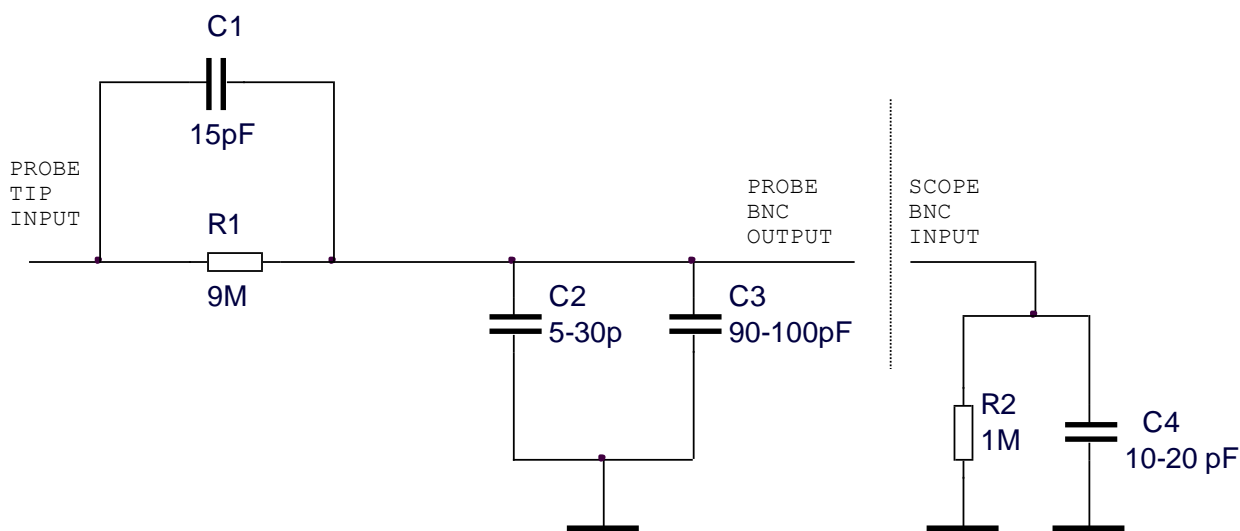


Рис. 22. Спрощена схема з пасивним пробником 10: 1, підключеним до осцилографа з вхідним опором $1\text{ M}\Omega$

Раніше не враховувалися ємнісні компоненти, а розглядалися тільки резистивні. Було визначено, що поєднання резистора наконечника пробника $9\text{ M}\Omega$ з вхідним опором осцилографа $1\text{ M}\Omega$ створює відношення діляника напруги "10-до-1". При низьких частотах або постійному струмі ігнорування ємнісних елементів допустимо. Але для вимірювання динамічних сигналів (а це основне призначення осцилографів) їх уже необхідно враховувати в електричній моделі пробника.

Паразитні ємності є невід'ємною частиною входів пробників і осцилографа. До них відносяться ємність кабелю пробника (C кабелю) і ємність входу осцилографа (C осцилографа). Термін "внутрішній / паразитний" означає, що ці елементи не закладені в конструкцію приладу, однак тим не менше в ній присутні і їх необхідно враховувати. Значення внутрішньої / паразитної ємності індивідуально для кожного осцилографа і пробника. Без додаткових вбудованих ємнісних компонентів, призначених для компенсації внутрішніх ємнісних елементів, опір системи при динамічних сигналах (не є постійним

струм) може привести до зміни загального динамічного загасання системи вимірювання від бажаного відносини 10: 1.

Метою додаткового / передбаченого конденсатора наконечника пробника (Снаконечника) і регульованого компенсаційного конденсатора (Скомп) є установка загасання ємнісного опору, яке відповідає резистивному загасанню 10:1. Коли компенсаційний конденсатор відрегульований правильно, це також гарантує, що постійна часу ємності наконечника пробника, паралельна резистору 9 МΩ, відповідає постійної часу внутрішньої і компенсаційної ємностей, паралельних вхідному резистору осцилографа 1 МΩ.

Не вдаючись в теоретичні основи, просто давайте підключимося до джерела сигналу і поспостерігаємо ефект від недостатньої, надлишкової і правильної компенсації. Спочатку підключіть пробник каналу 1 до іншого контакту (відмінному від того, що використовувався в попередніх випадках).

1. Підключіть пробник до контакту з підписом [Probe Comp] «Компенсація Пробника». Він має таку ж конструкцію, що і контакт з підписом [Demo] «Демонстрація».
2. На лицьовій панелі осцилографа натисніть клавішу [Default Setup] «Налаштування за замовчуванням».
3. Задайте для каналу 1 значення 1,0 В / поділ.
4. Встановіть на каналі 1 зсув / положення 0,0 В (значення за замовчуванням).
5. Щоб приблизно встановити рівень запуску на каналі 1 на 50%, натисніть ручку рівня запуску.
6. Встановіть для тимчасової розгортки осцилографа значення 200,0 мкс / поділ. Якщо пробники правильно компенсовані, то на дисплеї осцилографа відобразиться прямокутна хвиля з частотою 1 кГц і плоскою характеристикою, як на Рис. 23.

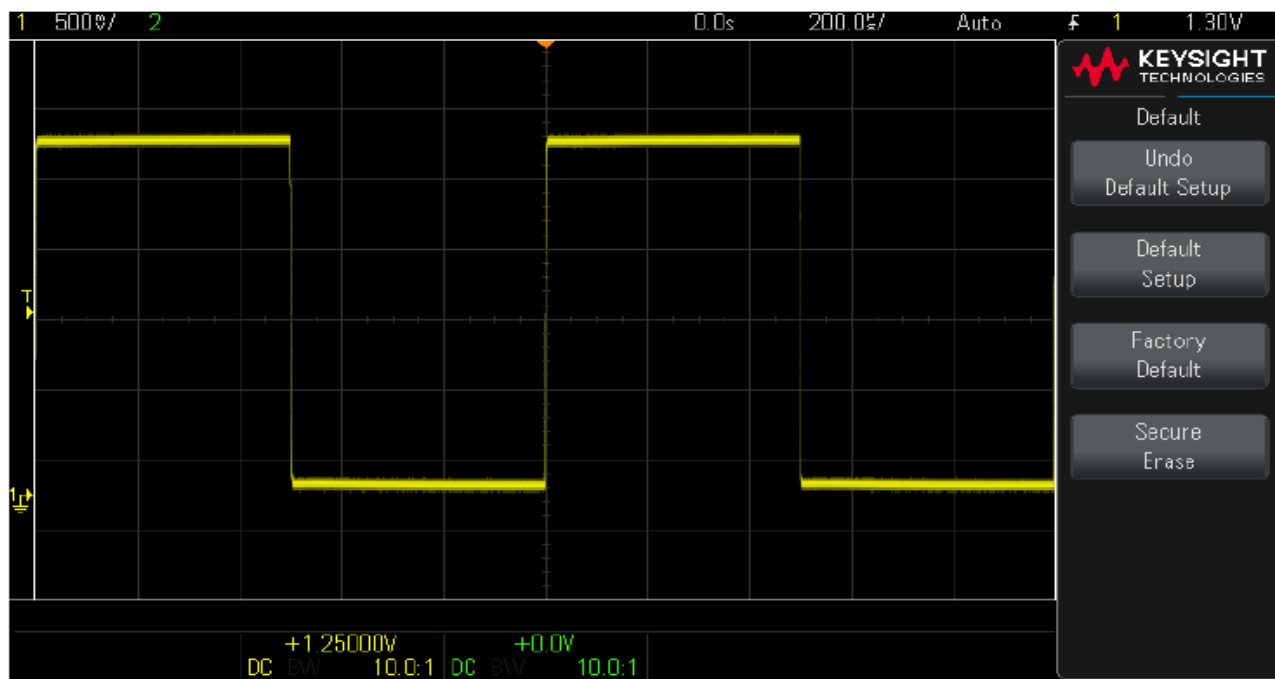


Рис.23. Використання сигналу компенсації пробника 1 кГц для компенсації пасивних пробників 10: 1

Тепер виконаємо компенсацію пробника.

7. За допомогою тонкої викрутки налаштуйте конденсатор змінної ємності на корпусі пробника. Зверніть увагу, що ця настройка іноді проводиться поруч з місцем підключення BNC на кожному пробники.

На Рис. 24 показаний приклад надлишкової компенсації пробника

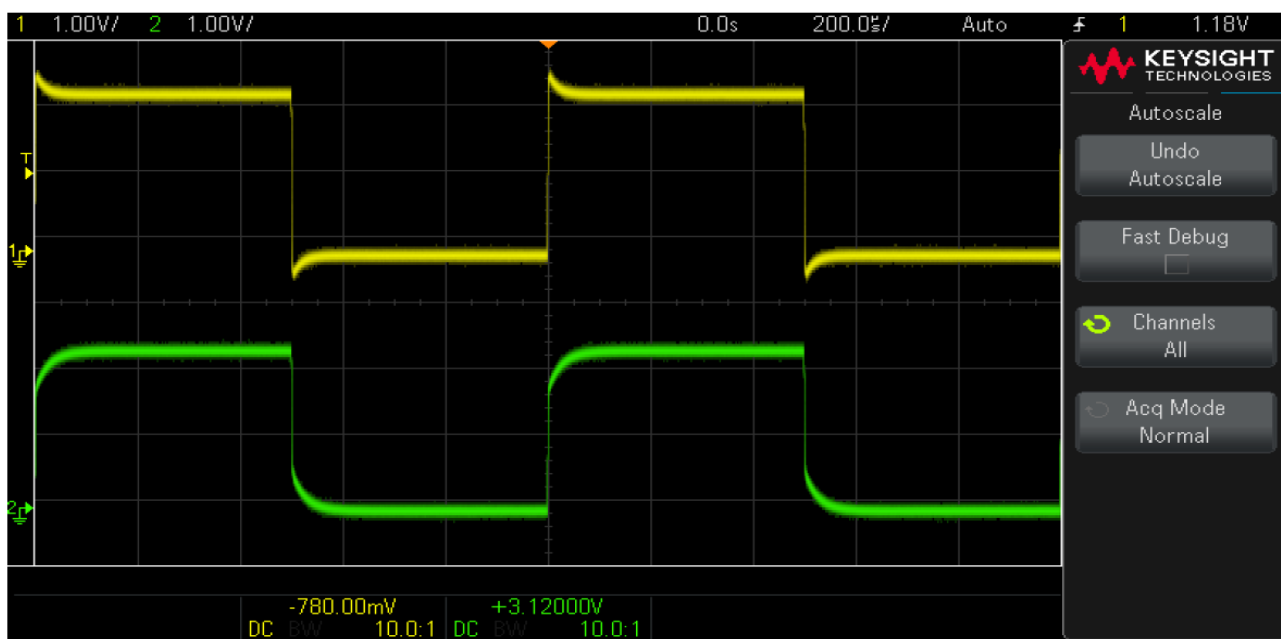


Рис. 24. Неправильна компенсація пробників

каналу 1 (жовта крива) і недостатньою компенсації пробника каналу 2 (зелена крива).

$R_{\text{наконечника}} = 9 \text{ М}\Omega$

$R_{\text{осцилографа}} = 1 \text{ М}\Omega$

$C_{\text{осцилографа}} = 15 \text{ пФ}$.

$C_{\text{кабелю}} = 100 \text{ пФ}$

$C_{\text{наконечника}} = 15 \text{ пФ}$

$C_{\text{парал}} = C_{\text{осцилографа}} + C_{\text{кабелю}} + C_{\text{комп}}$

$C_{\text{комп}} = ?$

Найпростіше обчислити значення ємності компенсації ($C_{\text{комп}}$), якщо прирівняти постійну часу ($1 / RC$) паралельного з'єднання $R_{\text{наконечника}}$ і $C_{\text{наконечника}}$ до постійної часу паралельного з'єднання $R_{\text{осцилографа}}$ і $C_{\text{парал}}$:

$$\frac{1}{R_{\text{наконечника}} \times C_{\text{наконечника}}} = \frac{1}{R_{\text{осцилографа}} \times C_{\text{парал}}}$$

У моделі пробника / осцилографа $C_{\text{парал}}$ є сумою трьох ємнісних елементів.

Інший спосіб розрахунку полягає в прирівнювання ємнісного опору $C_{\text{парал}}$, помноженого на 9, до ємнісного опору $C_{\text{наконечника}}$. Таким чином, коефіцієнт загасання, створюваний ємнісними опорами, буде рівний коефіцієнту загасання, створюваному виключно резистивною мережею (10: 1):

$$\frac{1}{2\pi f C_{\text{проб}}} = 9 \times \frac{1}{2\pi f C_{\text{парал}}}$$

8.6. Навантаження пробників

Паразитні ємності є невід'ємною частиною входів пробників і осцилографа. До них відносяться ємність кабелю пробника ($C_{\text{кабелю}}$) і ємність входу осцилографа ($C_{\text{осцилографа}}$). Термін "внутрішній /

Крім правильної компенсації пасивних пробників 10: 1, для забезпечення найбільшої точності вимірювань, проведених за допомогою осцилографа, необхідно також враховувати і навантаження пробників. Чи вплине підключення пробника і осцилографа до тестованого приладу. При підключенні будь-якого приладу до ланцюга цей прилад стає частиною тестованого пристрою і може створювати навантаження або в деякій мірі змінювати сигнали. Якщо використовувати задані значення опорів і ємності, наведені вище (і значення С комп, яке ми визначили), то можна уявити вплив навантаження від пробника і осцилографа у вигляді паралельного з'єднання опору і конденсатора, як показано на Рис. 25.

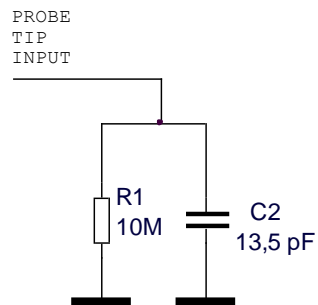


Рис. 25. Еквівалентна схема навантаження пасивного пробника 10: 1 і осцилографа

При низькій частоті сигналу або постійному струмі переважає навантаження з опором 10 МΩ, яка в більшості випадків не створює проблем. Але що станеться при вимірюванні цифрового тактового сигналу 100 МГц? 5-а гармоніка цифрового тактового сигналу, яка вносить значний вклад в форму сигналу, становить 500 МГц. Тепер визначимо опір, створюваний конденсатором ємністю 13,5 пФ, в схемі навантаження на Рис.25:

Незважаючи на те, що 13,5 пФ - це небагато, при високих частотах цієї ємністю навантаження вже не можна нехтувати. Для сигналів з високими частотами, як в нашому випадку, на більшості осцилографів передбачені активні пробники для вимірювань, у яких вхідна ємність

значно нижче (менше 1 пФ). Однак активні пробники коштують набагато дорожче звичайного пасивного 10: 1.

У більш точні моделі бажано включити ще й індуктивні елементи. Дріт, екран, особливо кабель заземлення, є індуктивним елементом, особливо при високих частотах.

8.7. Швидке перетворення Фур'є

Крім автоматичних параметричних вимірів даних сигналу осцилограф може виконувати математичні операції для всього сигналу або пари сигналів. Одна з найбільш часто використовуваних математичних функцій осцилографа - швидке перетворення Фур'є (FFT). ШПФ буде характеризувати частотні складові сигналу при одночасному перегляді сигналу тимчасової розгортки. Наприклад, якщо спостерігається імпульсна перешкода в вимірюваному сигналі, можна використовувати математичну функцію ШПФ для визначення частоти імпульсної перешкоди щодо сигналу. Визначення цієї частоти дозволить повернутися до схеми і визначити, що стало причиною виникнення цієї перешкоди. Розглянемо докладніше принцип роботи ШПФ.

1. Переконайтеся, що пробник осцилографа все ще підключений до контактів з підписом "Demo" (Демонстрація) і входу BNC каналу 1.
2. Натисніть кнопку [Default Setup] Налаштування за замовчуванням.
3. Натисніть кнопку [Help] Довідка, потім натисніть програмну кнопку «Додати сигнали»
4. За допомогою ручки введення виберіть сигнал «Тактовий» з короткочасною імпульсною перешкодою, потім натисніть програмну кнопку «Введення» для його включення.
5. Встановіть значення настройки В / поділ телеканалу 1 500 мВ / поділ.
6. Встановіть на каналі 1 зсув приблизно 1,00 В, щоб крива сигналу

перебувала у центрі екрана.

7. Щоб приблизно встановити рівень запуску на 50%, натисніть ручку рівня запуску.

8. Встановіть часову розгортку 1,000 мс / поділ. При такій часовій розгортці на екрані відображається багато циклів тактового сигналу, що і потрібно для виконання точної математичної функції ШПФ.

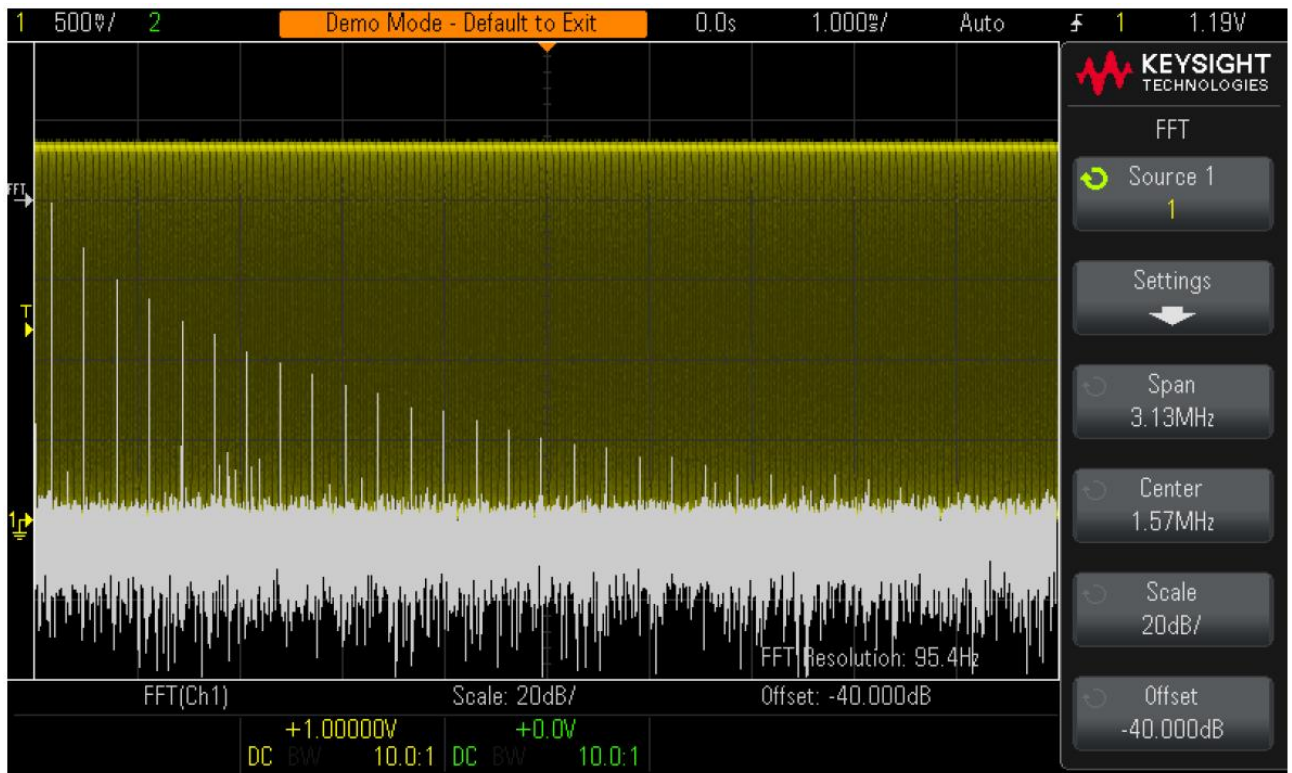


Рис. 26. Застосування математичної функції БПФ до повторюваного цифрового сигналу

відображаються сигнал часових інтервалів (вольти-час) і сигнал області частот (потужність в дБ-частота). Математична функція ШПФ виробляє розкладання сигналів до окремих частотних складових синусоїдальних хвиль. Як відомо з курсів з електротехніки та фізики, всі електричні сигнали, в тому числі цифрові, складаються з безлічі синусоїдальних хвиль різних частот. Ідеальний тактовий сигнал з робочим циклом 50% повинен складатися з основний частотної складової синусоїдальної хвилі (повторювана частота сигналу) і

непарних гармонік (3, 5, 7-й і т. д.). Неідеальні прямокутні хвилі також включають в себе парні гармоніки нижчих рівнів. Тепер визначимо частоти основної і непарних гармонік.

10. На лицьовій панелі натисніть кнопку [Cursors] Курсори (під ручкою "Курсори").

11. Натисніть програмну кнопку Джерело, потім поверніть ручку введення, щоб змінити значення Джерело з каналу 1 на БПФ.

12. Натисніть ручку "Курсори" і виберіть курсор X1.

13. Після закриття меню "Курсори", поверніть ручку введення так, щоб курсор X1 був нагорі піку найвищої частоти (з лівого боку дисплея).

14. Натисніть ручку "Курсори" ще раз і виберіть курсор X2.

15. Після закриття меню "Курсори", поверніть ручку введення так, щоб курсор X2 був нагорі 2-го піку найвищої частоти.

16. Визначте частоту з курсором X1 (це основна частотна складова (Показання внизу дисплея)).

17. Визначте частоту з курсором X2 (це третя гармоніка).

8.8. Амплітудно-частотна і фазо-частотна характеристика на екрані осцилографу

Дослідження амплітудно-частотної і фазо-частотної характеристики зручно опанувати за допомогою RC-ланцюжка, що інтегрує, Рис. 27.

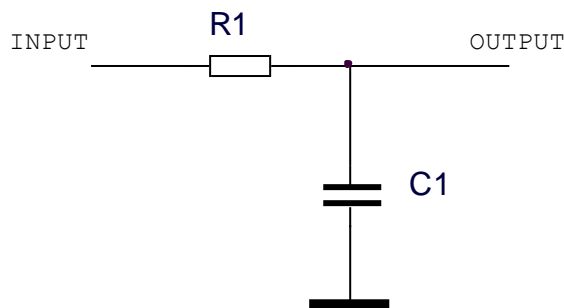


Рис. 27. RC-ланцюжок, що інтегрує

1. Виберіть резистор в межах 1-10 кОм.
2. Виберіть конденсатор в межах 1000-10000 пФ. З'єднайте їх за Рис. 27.

3. Використайте три пробники до осцилографа, встановлені перемикачем 1:1.

Першим пробником з'єднайте вихід 4 "Gen Out" і вільний вивід резистора. Другим пробником з'єднайте вхід першого каналу осцилографа і той же самий вивід резистора. Два наконечника пробників мають бути найближче до тіла резистора. Третім пробником з'єднайте спільну точку резистора і конденсатора з другим входом осцилографа

4. Всі земляні «крокодили» підключіть до вільного виводу конденсатора

5. Включіть осцилограф. Зачекайте, доки він пройде самоконтроль.

6. Натисніть кнопку 25 "Analyze", потім програмну кнопку «FRA Setup»,

Рис. 28.

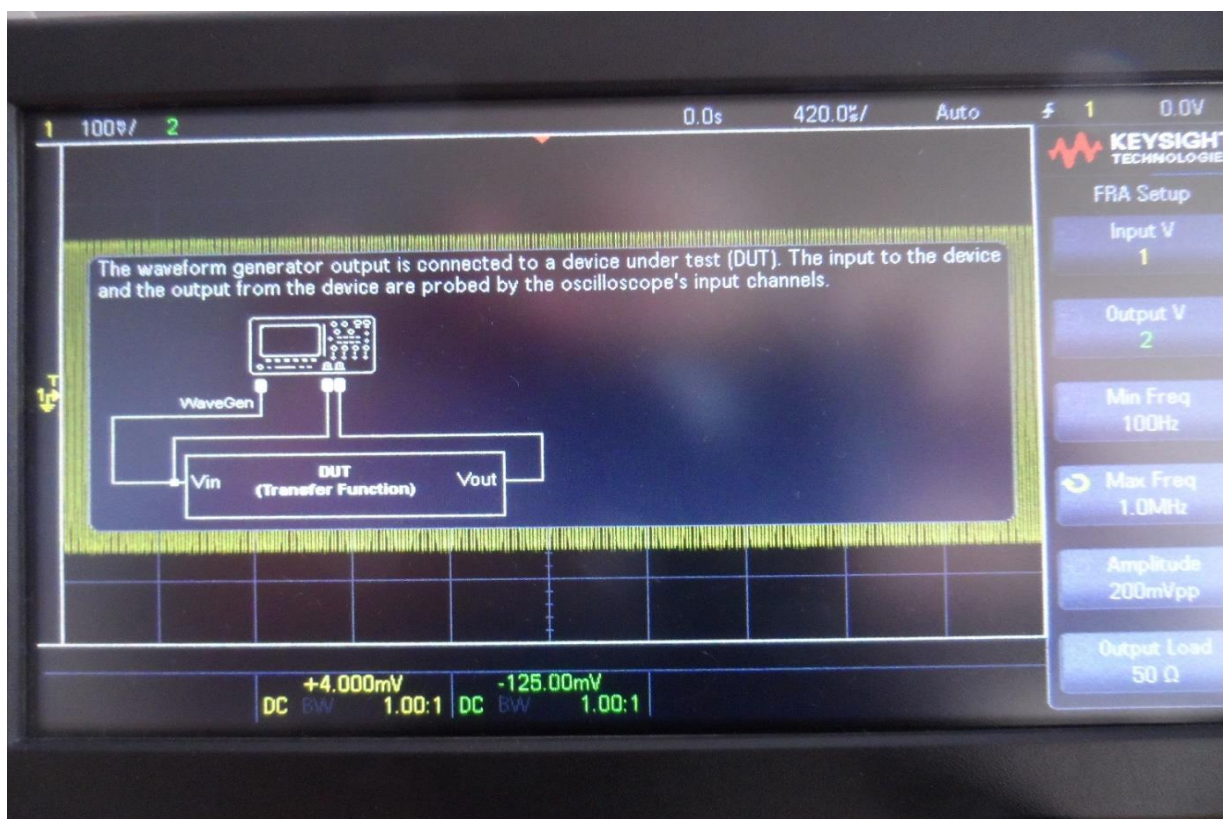


Рис. 28. Початок аналізу частотних характеристик.

7. Перевірте, чи відповідає монтаж схеми умовам креслення на екрані.

8. Встановіть межі аналізу: початкову частоту та кінцеву частоту, натискаючи відповідні програмні кнопки, Рис.17. Після цього натисніть кнопку “Wave Gen”.

Натисніть програмну кнопку “Run Analysis” і спостерігайте за даними частоти і значеннями амплітудно-частотної характеристики: ліворуч блакитним в дБ амплітуда виходу; праворуч рожевим - фази в градусах, Рис.29.



Рис.29. Розгортка частотних характеристик.

Колір графіка і відповідної осі співпадає.

8.9. Інші параметри

Осцилограф дозволяє вимірювати безліч корисних параметрів сигналів: фазу, фронт, зріз і таке подібне. Для цього в прилад вмонтовано зручний інтуїтивно зрозумілий інтерфейс та блок допомоги користувачу. Подробиці та корисні поради викладено також в керівництві [7].

9. Технічні основи вимірювання

Суть вимірювання полягає в тому, щоб порівняти сигнал з еталоном. Вимірювальний прилад – це в деякому сенсі похідна від еталону. Але до приладу ще потрібно мати методику вимірювання. Кожна з них починається з питання: до якого класу вимірювання відноситься дана операція вимірювання.

9.1. Класифікація вимірювань

Вимірювання поділяються [10-11] на:

- Статичні (якщо вимірювана величина постійна в часі)
- Динамічні (якщо в процесі вимірювання величина змінюється)

Способи отримання результатів:

- Прямі (вимірювання при яких шукане значення фізичних величин знаходяться безпосередньо з експериментальних даних. Наприклад виміряти опір резистора Омметром)
- Побічні (вимірювання, результат яких визначають на основі прямих вимірювань величин, пов'язаних з вимірюваною величиною відомою залежністю. Наприклад струм визначають, як напругу поділену на опір)
- Спільні (вимірювання, що проводяться одночасно для двох або декількох неоднойменних величин для знаходження функціональної залежності між ними. Наприклад струм колектора та струм бази визначають підсилення транзистора:

$$\beta = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_b} \text{ - динамічне}$$

$$B = I_k / I_b \text{ - статичне}$$

- Побічні, наприклад струм колектора та напруга база-емітерного переходу визначають струм насичення (формула Шоклі) який виміряти прямими вимірюваннями досить важко.

- Сукупні - вимірювання при яких одночасно проводяться вимірювання кількох однойменних величин, а значення шуканої величини знаходять рішенням системи рівнянь, отриманих при прямих вимірюваннях. Наприклад, розрахунок так званих контурних струмів за значення струмів в окремих елементах схеми.

9.2. Похибки вимірювань

Похибки вимірювань [10-11] – відхилення результатів вимірювань засобами вимірювальної техніки (ЗВТ) від істинного значення вимірювань величин. За способом вираження результатів вимірювань, похибки поділяють на абсолютні та відносні.

Абсолютні – вимірювання які основані на прямих вимірюваннях або кількох основних величин або використання значень фізичних констант.

Відносні – вимірювання відношення величин до однойменної величини, що відіграє роль одиниці або вимірювання величини по відношенню до однойменної величини, що прийнята за вихідну.

Наприклад, прилад що вимірює відношення струмів називається логометр.

Основними характеристиками вимірювань є: 1. Принцип вимірювань 2. Метод вимірювань 3. Похибка 4. Точність 5. Вірність 6. Достовірність

Клас точності – значення у % абсолютної похибки вимірювань приладу в робочій частині шкали до верхньої межі діапазону вимірювань.

Клас точності – узагальнена характеристика ЗВТ, що визначається границею основних та додаткових похибок, а також іншими, що впливають на його точність, значення яких регламентовані стандартами на окремі види ЗВТ.

Наприклад, якщо манометр на верхню межу вимірювання $\frac{500 \text{ кг}}{1 \text{ см}^2}$ має клас точності 2, то це означає, що максимально можлива похибка становить 2% від $\frac{500 \text{ кг}}{1 \text{ см}^2}$ і $= 10 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$.

9.3. Похибки приладів

Найважливішою характеристикою кожного вимірювального приладу є його похибка [10-11]. Точність електровимірювальних приладів лежить в основі розподілу приладів на класи. Електровимірювальні прилади відповідно до величини їх зведеної похибки поділяються на вісім класів точності: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. Прилади класів точності 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 використовують головним чином для точних лабораторних вимірювань і називають прецизійними; прилади класів 1,0; 1,5; 2,5; 4,0 мають назву технічних.

Абсолютною похибкою приладу ΔX є модуль різниці між показаннями приладу $X_{\text{пр}}$ і дійсним значенням вимірюваної величини X_0 :

$$\Delta X = |X_{\text{пр}} - X_0|.$$

За дійсне значення вимірюваної величини X_0 приймають її значення, що вимірюється за допомогою зразкових приладів.

Зведена похибка приладу виражається у відсотках (%).

$$\delta_{\text{пр.}} = \frac{\Delta X_{\text{пр.}}}{X_{\text{max}}} \cdot 100\%$$

Клас точності приладу дорівнює зведеній похибці.

Приклад. Нехай виміряне значення сили струму дорівнює 75мА. Вимірювання струму виконували міліамперметром із шкалою на 250 мА. Клас точності 1,5. Тоді абсолютна похибка приладу

$$\Delta I_{\text{пр.}} = \frac{\delta_{\text{пр.}} \cdot I_{\text{max}}}{100} = \frac{1,5 \cdot 250 \text{ мА}}{100} = 3,75 \text{ мА}.$$

Відносна похибка вимірювання величини струму

$$\delta = \frac{\Delta I_{\text{пр.}}}{I} \cdot 100\% = \frac{3.75}{75} \cdot 100\% = 5\%$$

З наведеного прикладу зрозуміло, що коли треба проводити вимірювання з високою точністю, то прилад треба підібрати такий, щоб вимірюваний струм викликав відхилення стрілки, найбільш близьке до максимального значення I_{max} .

Повірка приладів на відповідність класі точності виконується за допомогою **калібраторів** або зразкових приладів точність яких на порядок перевищує точність приладу, що проходить повірку.

Похибки вимірювання за іншими визначеннями [11]:

Мультиплікативна похибка $\Delta_{\text{мультипл}}$ нарастає пропорційно вимірюваній величині X , в той час як адитивна похибка $\Delta_{\text{адитив}}$ вимірювання величини X має рівномірний розподіл, Рис. 30.[11]:

Сумарна похибка $\Delta = \Delta_{\text{адитив}} + \Delta_{\text{мультипл}}$

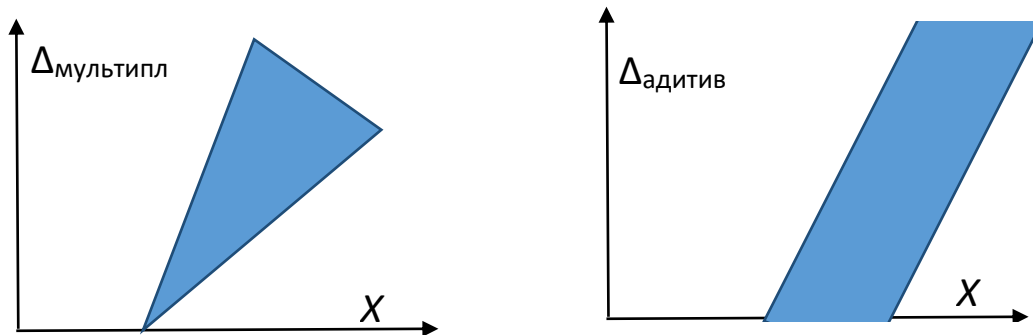


Рис. 30. Мультиплікативна похибка $\Delta_{\text{мультипл}}$ та адитивна похибка $\Delta_{\text{адитив}}$

9.4. Непрямі та сукупні вимірювання

Непряме вимірювання – вимірювання, у якому значення однієї чи декількох вимірюваних величин знаходять після перетворення роду величини чи обчислення за відомими залежностями їх від декількох величин аргументів, що вимірюються прямо.

Непрямі вимірювання поділяються на *опосередковані, сумісні та сукупні*. Опосередковане вимірювання. Непряме вимірювання однієї величини з перетворенням її роду чи обчисленнями за результатами вимірювань інших величин, з якими вимірювана величина, пов'язана явною функціональною залежністю. Характерним для опосередкованих вимірювань є функціональне вимірювальне перетворення, яке здійснюється або шляхом фізичного вимірювального перетворення, або шляхом числового вимірювального перетворення.

Сукупне вимірювання – непряме вимірювання, в якому значення декількох одночасно вимірюваних однорідних величин отримують розв'язанням рівнянь, то і пов'язують різні сполучення цих величин, які вимірюються прямо чи опосередковано.

Прикладом сукупних вимірювань може бути вимірювання опору кожного з двох резисторів R_1 , R_2 , з'єднаних послідовно та паралельно. В результаті прямого вимірювання омметром послідовно з'єднаних опорів маємо $R_{\text{пос}}=R_1+R_2$, а сумарна провідність паралельно

з'єднаних резисторів становить $\frac{1}{R_{\text{пар}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$. Із системи з двох

рівнянь із двома невідомими обчислюємо шукані значення сукупно виміряних опорів R_1 , R_2 .

Сумісне вимірювання – непряме вимірювання, в якому значення декількох одночасно вимірюваних різнорідних величин отримують розв'язанням рівнянь, які пов'язують їх з іншими величинами, що вимірюються прямо чи опосередковано.

Статичне вимірювання – вимірювання величини, яку можна вважати незмінною за час вимірювання, коли похибкою, що виникає від її зміни, можна знехтувати .

Динамічне вимірювання – вимірювання величини, що змінюється за час вимірювання.

Вимірювання за ознакою особливостей визначення їх похибок класифікують на лабораторні та технічні.

Відносне вимірювання – вимірювання відношення величини до іншої однорідної величини. Вимірювання ФВ за співвідношенням між кількістю виміряних величин та кількістю вимірювань поділяють на не надлишкові одноразові та надлишкові які виконуються або одноканально багаторазово, або багатоканально одноразово, зокрема, із метою зниження рівня випадкових похибок шляхом усереднення.

9.5. Визначення випадкових похибок прямого вимірювання

Пряме вимірювання – це вимірювання однієї фізичної величини, значення якої знаходять безпосередньо: без перетворення її роду та використання функціональних залежностей [1].

Прямі багатократні вимірювання поділяються на рівно та нерівно точні. Рівно точними називаються вимірювання, що проводяться засобами вимірювання однакової точності за однією і тією ж методикою при незмінних зовнішніх умовах. При рівно точних вимірюваннях середні квадратичні відхилення результатів всіх рядів вимірювань рівні між собою.

Задача обробки результатів багатократних вимірювань [10-11] полягає в знаходженні оцінки вимірюваної величини і довірчого інтервалу, в якому знаходиться її дійсне значення. При статистичній обробці результатів багаторазових спостережень необхідно виконати наступну послідовність дій:

- провести багаторазові вимірювання і отримати масив X_1, X_2, \dots, X_n вимірювальної інформації;
- поправити результати вимірювання, вилучивши відомі систематичні похибки шляхом внесення поправок у результати спостережень;
- знайти математичне сподівання поправлених результатів спостереження і прийняти його за дійсне значення. Для нормального

закону розподілу, а якщо поступитися ефективністю оцінки, то й для всіх симетричних законів розподілу, за оцінку математичного очікування ряду рівноточних спостережень приймають середнє арифметичне, що визначається за формулою:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

— визначити випадкове відхилення за наступною формулою:

$$g_i = X_i - \bar{x};$$

Дана різниця представляє собою випадкове відхилення (випадкову абсолютну похибку) при i -му спостереженні.

9.6. Визначення випадкових похибок опосередкованого вимірювання

Оцінку випадкових похибок опосередкованих вимірювань необхідно здійснювати за такою методикою [10-11]:

1. Визначити для результатів прямих вимірювань \bar{x} і $\sigma[\bar{x}]$;
2. Визначити значення невідомої величини $\bar{q} = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n)$;
3. Визначити «вагу» кожної часткової похибки опосередкованих вимірювань
4. Обчислити часткові випадкові похибки опосередкованих вимірювань.
5. Знайти оцінку СКВ результату опосередкованих вимірювань.
6. Знайти коефіцієнт t_{α} Стюдента за заданою довірчою ймовірністю P і кількістю вимірювань n .
7. Знайти граничні значення випадкової складової похибки, яку приймають за похибку опосередкованого вимірювання.
8. Записати результат опосередкованого вимірювання.

10. Підсилювачі сигналу для схем вимірювання

Сучасні вимірювальні прилади малих струмів та напруги будуються на основі операційних підсилювачів та їх поєднанням у спеціальні вимірювальні схеми. Вхідні каскади операційних підсилювачів містять диференційні підсилювачі, які складають основу як аналогової електроніки, так і швидкодіючої цифрової (так звана емітер-зв'язана транзисторна логіка). Без диференційного підсилювача складно побудувати якісний нуль-орган, АЦП, ЦАП і т.п. Отож першим кроком необхідно усвідомити роботу диференційного підсилювача. Найпростіше – на основі біполярних транзисторів. Але без розуміння роботи діода складно зрозуміти роботу транзистора. Тим паче, що для розуміння основ перетворення змінного струму в постійний в схемі вимірювання конче потрібні хоча б первісні знання про діод.

10.1. Поняття про діод та біполярний транзистор

Напівпровідникові прилади: транзистори, діоди на основі електронної провідності [12] в 2,5 рази перевищують за робочою частотою аналогічні з дірковою провідністю. Це визначається більшою рухливістю електронів в напівпровідниках. Отже дуже коротко, конспективно. Для подальшого викладення будемо вважати що діод утворює несиметричний ступінчатий р-п-перехід у якого одна з областей є сильно легована і вона називається емітер. Інша слабо легована – вона називається база. Завжди область р – це анод, область п – це катод. Якщо подати на катод напругу з полярністю «-», а на анод з полярністю «+», то через діод буде проходити струм у прямому напрямку. Струм у зворотньому напрямку малий і його поки що навіть не розглядаємо. Вважаємо, що струм у зворотньому напрямку прагне до нуля. При виготовленні на пластинах кремнію провідність вихідної пластини дає базу. Рух носіїв в кремнії завдяки полю – це дрейф. Рух завдяки більшості-меншості – дифузія. Модель

діода побудована на основі рішення рівняння розподілу носіїв в базі, яке відноситься до диференціальних рівнянь дифузії. Залежність струму діода від напруги віднайшов вчений Шоклі [12].

Вольт-амперна характеристика ідеалізованого діода

Вольт-амперна характеристика (ВАХ) ідеалізованого кремнієвого діода представлена на рис.31.

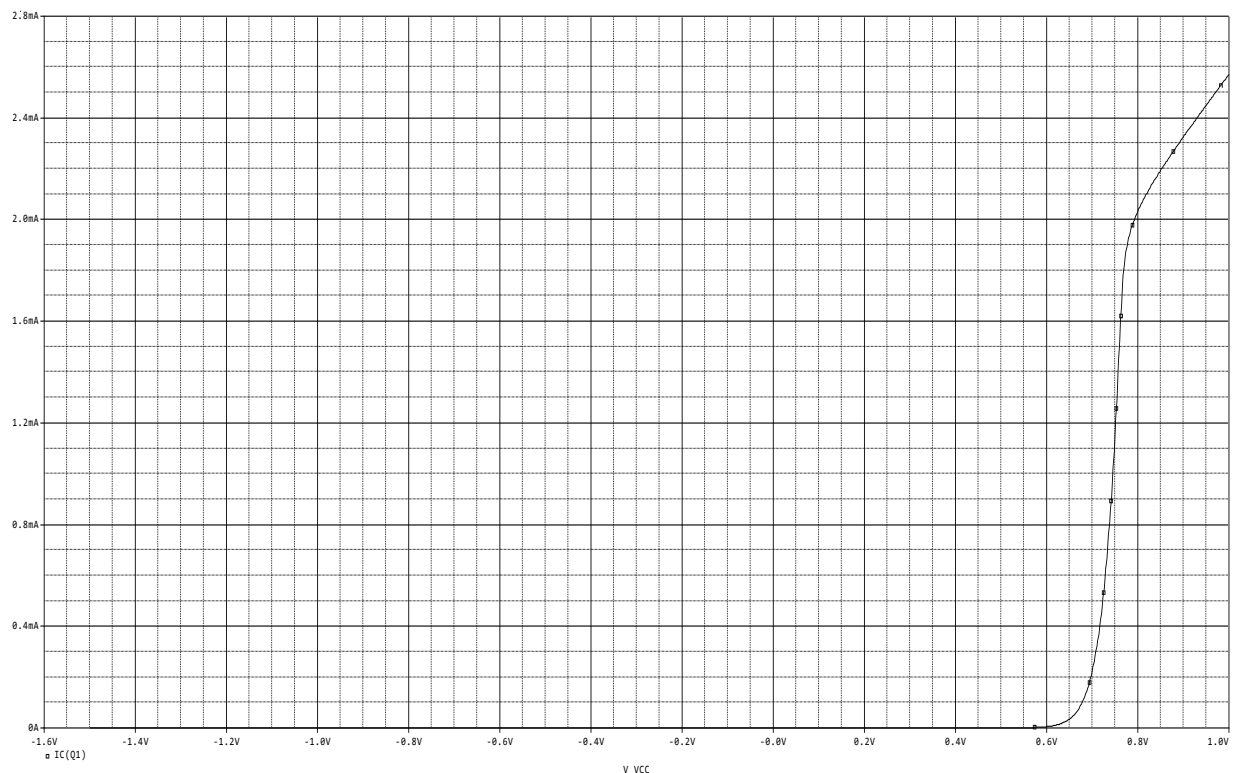


Рис.31. Вольт-амперна характеристика діода

Значення струму за напругою дає формула Шоклі [12]

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right]$$

де:

U - напруга на електродах, I_0 -струм насичення, q - заряд електрона, k - постійна Больцмана, T - абсолютна температура діода. Зворотній струм діода обчислюється за зміни знака напруги:

$$I = I_0 \left[\exp\left(-\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right] = I_0 \left[1/\exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right] \approx -I_0.$$

Еквівалентний статичний опір визначається як відношення напруги до струму: $R_{\text{ЕКВІВ}} = U / I$. Опір визначається тільки умовно: за конкретними

умовами і результатами вимірювання. Сталого опору діода не існує. Динамічний опір діода [12]:

$$r = \frac{\varphi_T}{I_d} \quad (1)$$

Струм через діод визначається статичним опором, а частотні властивості - динамічним опором та ємностями діода: бар'єрною та дифузійною. Ще раз – опір діода, ємності – це тільки еквіваленти опору та ємності, які прив'язані до конкретних умов вимірювання.

10.2. Транзистор

Досить в діод провести ще одну дифузію, і отримуємо транзистор [9]. (Часом роблять трохи інакше, але так простіше уявити структуру). Третій електрод до останньої дифузії названо колектором – збирачем носіїв з бази.

Особливість транзистора полягає в тому, що його робота може бути представлена повністю тими самими рівняннями що і для діоду з використанням поправочних коефіцієнтів. Ідеалізація формули Шоклі, що використовується для транзисторів і діодів, полягає в тому, що нехтують падінням напруги, яке утворюється в матеріалі бази, а тим паче емітера. Бо опір емітера на два порядки менший, ніж опір бази.

Умови ідеалізації р-п-переходу [12]:

Ширина р-п-переходу дуже мала. Процеси, що відбуваються, будуть враховані окремо для кожної моделі. Падіння напруги в базі в багато менше ніж на електродах - малий рівень інжекції. Мається на увазі, що емітер використовується тільки свої початкові можливості (до 10%) для інжекції носіїв у базу. Рівень інжекції вказує на скільки ми використовуємо коефіцієнт інжекції.

Таким чином, транзистори є напівпровідниковими приладами, які складаються з двох електронно-діркових переходів, виконаних на одному кристалі. За будовою та принципом дії транзистори поділяють на два великі класи: біполярні транзистори й польові транзистори. До

кожного з цих класів входять численні типи транзисторів, що відрізняються за будовою і характеристиками. Поки що нас будуть цікавити лише біполярні транзистори. Ми вже знаємо, що в біполярному транзисторі є три області: емітер, база та колектор. Перехід, який утвориться на межі областей емітер - база, називається емітерним, а на межі база - колектор – колекторним, рис.32-33. Провідність бази може бути як електронною, так і дірковою; відповідно розрізняють транзистори зі структурами р-п-р, рис.20, та n-р-n, Рис. 21.

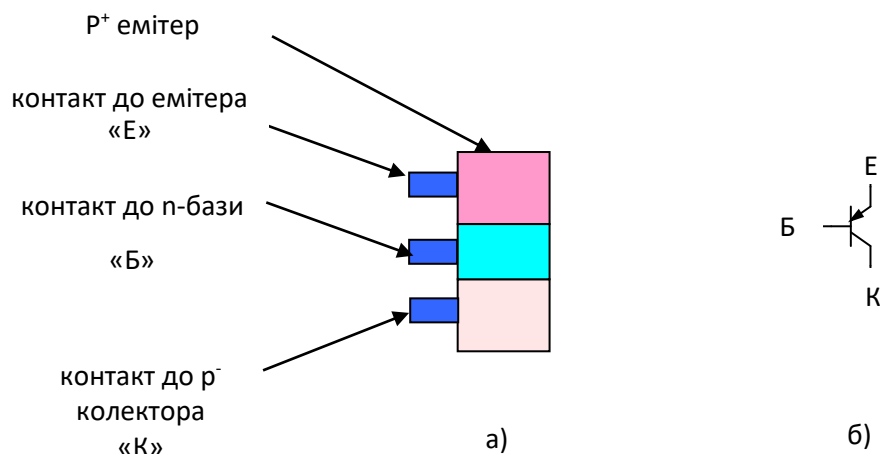


Рис.32. Схематичне зображення транзистора типу р-п-р (а), та умовне графічне позначення транзистора (б)

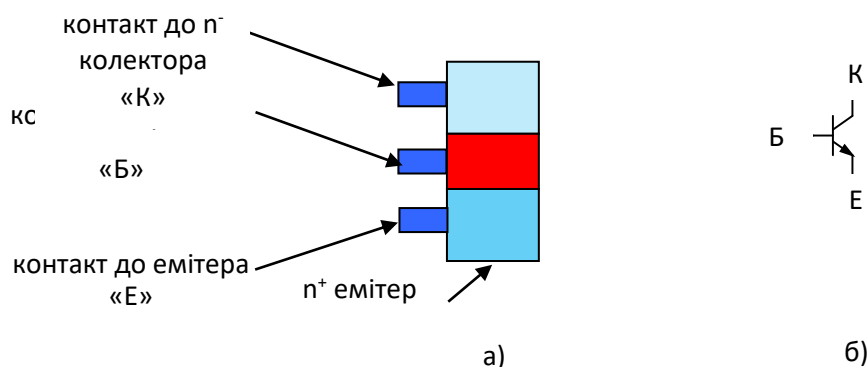


Рис.33. Схематичне зображення транзистора типу n-р-n (а), та умовне графічне позначення транзистора (б)

Перший працездатний точковий транзистор створено 16 грудня 1947 року.

Площинний транзистор. Основна ідея площинного транзистора полягає в тому аби процеси переносу носіїв струму з поверхні перенести в глибину, бо поверхня має завжди так звані поверхневі стани. Не існує спеціальної моделі роботи транзистора. Для опису роботи транзистора застосовують формулу Шоклі для р-n-переходу з необхідними поправками, коефіцієнтами та доповненнями. За цією основою і створені моделі транзистора Мола-Еберса, Гумеля-Пуна та різноманітні їх доповнення. Та в кожній з них основу складає саме формула Шоклі для р-n-переходу.

ВАХ транзистора як залежність струму колектора від напруги колектора при ступінчатому зростанні струму бази наведені на Рис.34. Для спостереження цієї ВАХ емітер було підключено до землі, а на базу від джерела з великим вихідним опором подавався фіксований струм: спочатку струм бази складав 20 мкА. Зміною напруги на колекторі від 0 В до 15 В викликали зміну струму колектора. Так змалювався перший, найнижчий ступінь ВАХ. Надалі встановили струм бази 20 мкА і знову на колекторі поволі підіймали напругу від 0 до 15 В. Одержали другий ступінь ВАХ. Так, збільшуючи для кожного разу струм бази на 10 мкА, поступово отримали повну картину властивостей транзистора, що відображено на Рис.22. Умови такого експерименту називаються схемою включення транзистора із спільним емітером. Це – найпоширеніша схема включення і саме вона використовується для побудови вхідної частини диференційного підсилювача, до якого ми поступово наближуємося. Характеристики підсилення схеми з спільним емітером (СЕ) складають відношення струму колектора до струму бази.

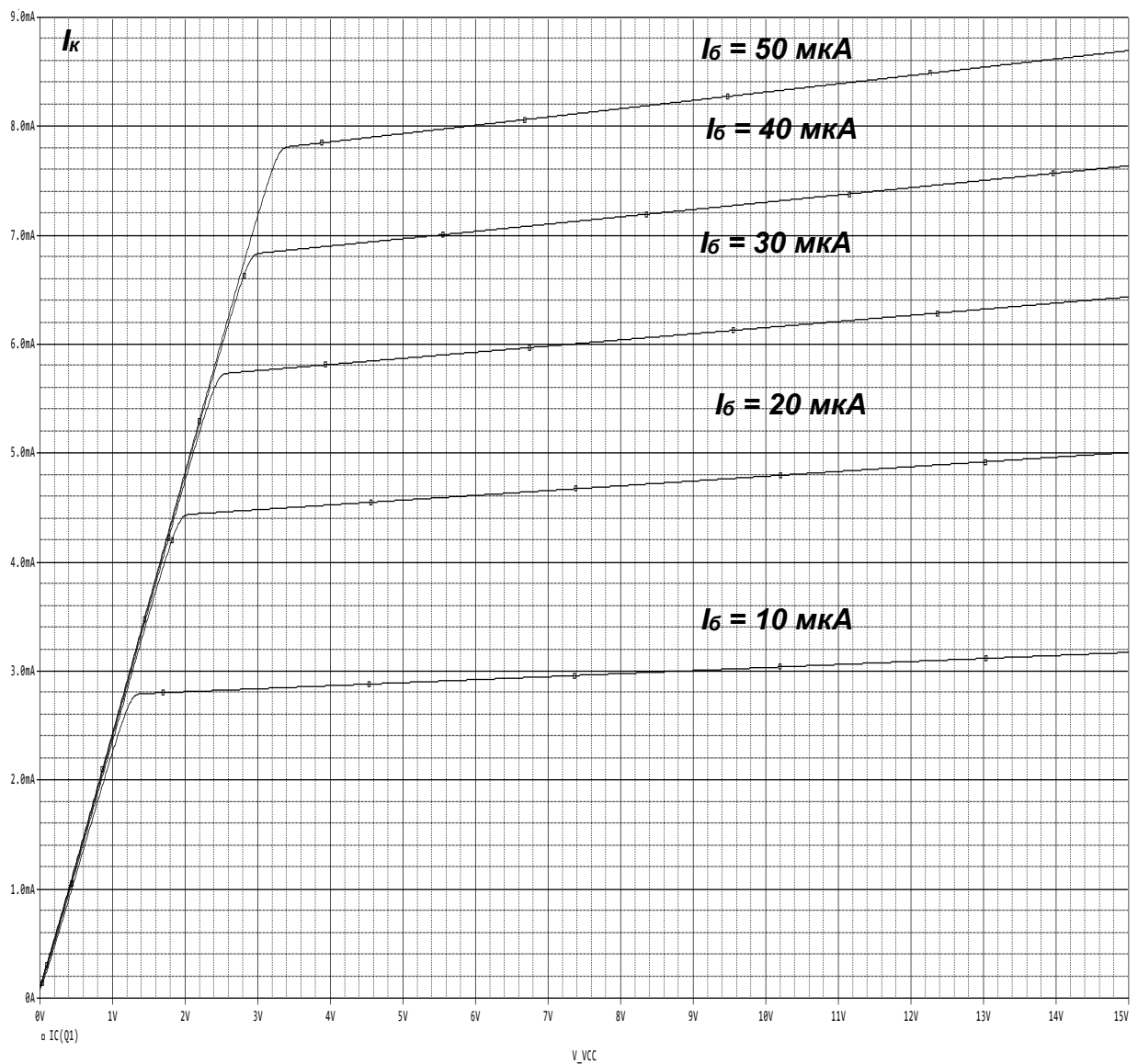


Рис.34. ВАХ транзистора як залежність струму колектора від напруги колектора при заземленому емітері і ступінчатому зростанні струму бази

Відношення струму колектора I_c до струму бази I_b при заданій напрузі на колекторі U_c складають статичний коефіцієнт підсилення, що позначають великою латинською літерою $B = I_c / I_b$. Наприклад, за Рис.3 для $U_c = 15$ і $I_b = 20$ мкА, $B = 5$ мА / 20 мкА = 250. Отже коли в області 20 мкА трохи збільшувати-зменшувати струм бази, то в струмі колектора ці зміни будуть у 250 разів більші. Саме це і є ефект підсилення струму бази, або просто підсилення (про базу вже не говорять, але мають на увазі).

Аналізуючи рис.34 можна помітити, що відстань між ступенями ВАХ зменшується. Отже підсилення не рівномірне. Аби врахувати це

розглядають динамічний коефіцієнт підсилення як відношення зміни струму колектора до струму бази [12]

$$\beta = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b}$$

10.3. Схеми підключення транзисторів

Узагальнено можемо вважати [12], що будь-яка схема підключення транзистора характеризується двома основними показниками:

- коефіцієнт підсилення за струмом $n = I_{\text{вих}}/I_{\text{вх}}$, за напругою $n = U_{\text{вих}}/U_{\text{вх}}$,
- вхідний опір $R_{\text{вх}} = U_{\text{вх}}/I_{\text{вх}}$
- вихідний опір $R_{\text{вих}} = U_{\text{вих}}/I_{\text{вих}}$

10.4. Схема зі спільним емітером

Варіант схеми зі спільним емітером [12] надано на Рис.34. В цій схемі резистор $R1$ виконує функцію найпростішого перетворювача струму колектора в напругу вихідного сигналу. Реально замість резистора може бути датчик струму, коливальний контур і т.п. Функцію

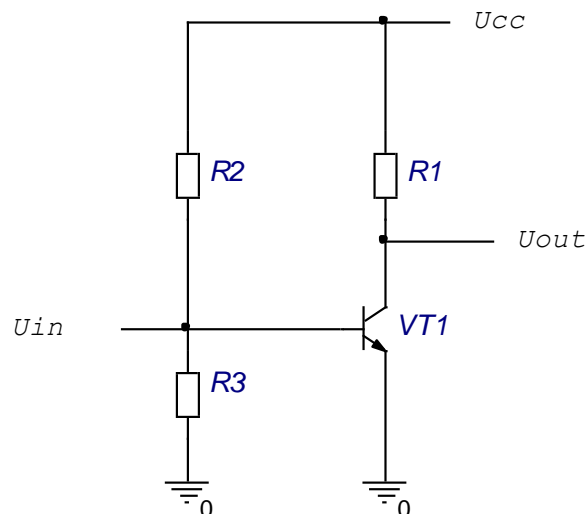


Рис.34. Варіант схеми включення транзистора зі спільним емітером

джерела початкового струму бази, що задає робочу точку згідно рис.34 виконують джерело напруги живлення та резистор $R2$. Резистор $R3$ виконує допоміжну функцію стабілізації робочої точки.

Таким чином, за схемою підключення транзистора зі спільним емітером (СЕ) вхідний сигнал подається на базу, часто через конденсатор, а знімається з колектора. При наявності навантаження у вигляді резистора $R1$ між колектором та живленням фаза вихідної напруги сигналу відрізняється від вхідної на 180° . Схема СЕ підсилює і струм, і напругу. Особливістю схеми зі спільним емітером є максимальний серед трьох типових схем підсилювачів коефіцієнт підсилення за потужністю. Схема СЕ має ряд негативних проявів:

- відносно високі в порівнянні з іншими схемами включення транзистора нелінійні спотворення сигналу, що обумовлюється нелінійністю вольт-амперної характеристики транзистора, рис.34, та високим вихідним опором схеми;
- низька частота зрізу внаслідок так званого ефекту Міллера (впливає так звана ємність Міллера, тобто ємність колектор-база).

Крім того, при даній схемі підключення, на характеристики підсилювача значно впливають зовнішні чинники, такі як напруга живлення, або температура довкілля. Зазвичай для компенсації цих чинників застосовують негативний зворотний зв'язок, але він знижує коефіцієнт підсилення.

10.5. Схема зі спільною базою

Схема зі спільною базою [12] наведена на Рис.35. Вхідний сигнал подається в емітер. База заземлена за змінним струмом через конденсатор. Інформаційним є сигнал змінної напруги U_{in} .

- Коефіцієнт підсилення за струмом: $I_{e_{ux}}/I_{e_{x}}=I_k/I_e=\alpha$ [$\alpha < 1$]

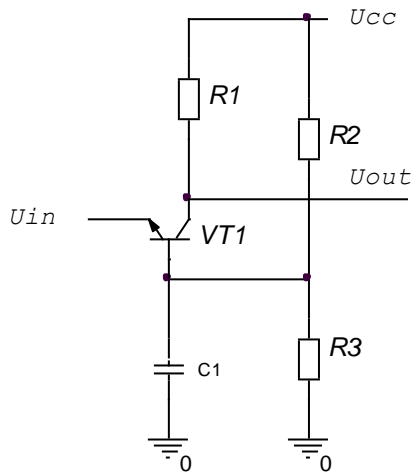


Рис. 35. Варіант схеми включення транзистора зі спільною базою

- Коефіцієнт підсилення за напругою: $U_{вих}/U_{вх}=U_k/U_b=\gamma$ [$\gamma > 1$]
- Вхідний опір $R_{вх}=U_{вх}/I_{вх}=U_{бе}/I_e$.

Вхідний опір для схеми зі спільною базою малий і не перевищує 100 Ом для малопотужних транзисторів, оскільки вхідний ланцюг транзистора при цьому є відкритим емітерним переходом транзистора.

Переваги:

- Гарні температурні та частотні властивості.
- Висока допустима напруга на колекторі.

Недоліки з точки зору підсилення:

- Мале підсилення за струмом, оскільки $\alpha < 1$
- Малий вхідний опір
- Великий вихідний опір

Тобто, ця схема характеризується відсутністю підсилення за струмом (коефіцієнт передачі близький до одиниці, але менший від неї), високим коефіцієнтом підсилення напруги і помірним (в порівнянні зі схемою зі спільним емітером) коефіцієнтом підсилення потужності. Фази вхідного і вихідного сигналу збігаються. Особливістю схеми зі спільною базою є мінімальний, серед трьох типових схем підсилювачів, «паразитний» зворотний зв'язок з виходу на вхід через

конструктивні елементи транзистора. Тому схема зі спільною базою найчастіше використовується для побудови високочастотних підсилювачів, особливо поблизу верхньої границі робочого діапазону частот транзистора. Наприклад – антенний підсилювач. Популярна при побудові генераторів.

10.6. Схема зі спільним колектором (емітерний повторювач)

Схема зі спільним колектором [12] (емітерний повторювач) наведена на рис.36.

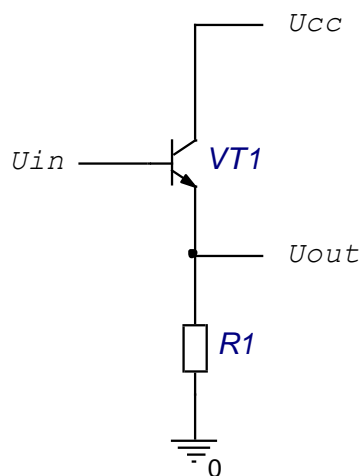


Рис.36. Варіант схеми включення транзистора зі спільним колектором (емітерний повторювач)

Ця схема характеризується тим що вхідний сигнал подається на базу, а знімається з емітера. При цьому фаза вихідного сигналу співпадає з фазою вхідного сигналу. Забезпечує підсилення тільки за струмом. Є поширеною схемою.

- Коефіцієнт підсилення за струмом: $I_{eUX}/I_{eX}=I_e/I_b=I_e/(I_e-I_k) = 1/(1-\alpha) = \beta$ [$\beta \gg 1$]
- Вхідний опір: $R_{eX}=U_{eX}/I_{eX}=(U_{be}+U_{out})/I_b$

Переваги

- Великий вхідний опір $R_{eX} = \beta R1$ для малих частот.
- Малий вихідний опір
- Гарні частотні властивості

Недоліки

- Коефіцієнт підсилення за напругою менше 1

10.7. Диференційні підсилювачі

Одиночні каскади: зі спільним емітером або зі спільною базою мають багато істотних недоліків. Серед них – температурна залежність база-емітерного переходу. Цей недолік одразу впадає в око навіть початківцям з дослідження підсилювачів. Але вже з набутим досвідом відчувається ще один – це чутливість до синфазного сигналу. Подолати ці недоліки можливо за допомогою диференційних підсилювачів.

10.8. Простий диференційний підсилювач

Призначений для підсилення диференційних сигналів [12].

Диференційний сигнал – сигнал між входом U_{inp+} та U_{inp-} ($+U_{inp}$ та $-U_{inp}$).

Синфазний сигнал – середній рівень диференційного сигналу. Вимірюється та досліджується як сигнал між рівнем «землі» та закороченими входами диференційного підсилювача.

Основні параметри диференційного підсилювача:

1. Коефіцієнт підсилення – відношення прирощення вихідного сигналу до прирощення вхідного диференційного сигналу.
2. Коефіцієнт усунення впливу джерела живлення – відношення прирощення вихідного сигналу до прирощення напруги відповідного джерела живлення.
3. Коефіцієнт усунення впливу синфазного сигналу – відношення прирощення вихідного сигналу до прирощення синфазного сигналу – напруги на закорочених входах диференційного підсилювача.
4. Вхідні струми та їх різниця
5. Максимальна та мінімальна вихідна напруга

Повний перелік параметрів може зайняти декілька сторінок.
 Ідеальний підсилювач не чутливий до синфазного сигналу.
 Простий диференційний підсилювач наведено на рис.37.

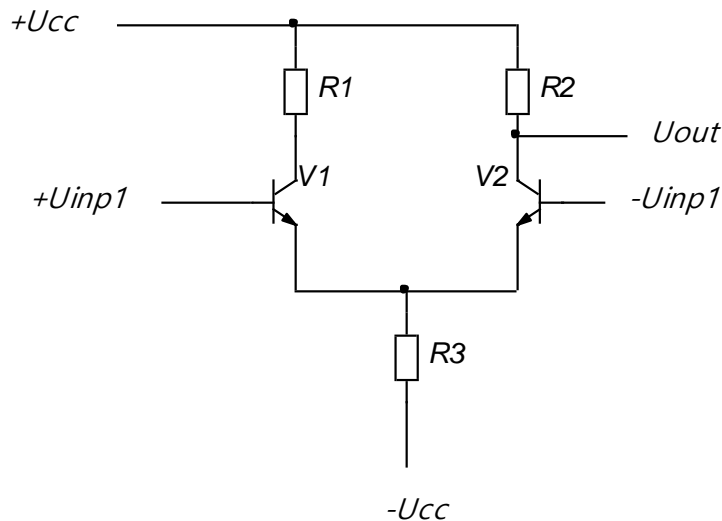


Рис.37. Простий диференційний підсилювач

Такий простий диференційний підсилювач (ДП) знаходить застосування в схемах, де вимоги до утиснення синфазної завади помірні. Транзистори V1 та V2 включені за схемою, що еквівалентна схемі із спільним емітером, де точкою землі є точка сполучення емітерів. Доведення цього факту відтермінуємо до часу вивчення електронних ланцюгів.

Коефіцієнт підсилення K_U диференційного сигналу обраховується як відношення

$$K_U = \frac{R_2}{2RE} \quad (2)$$

Де RE – динамічний опір переходу емітер-база, що визначається за формулою для діода (1) і струмом емітера I_e [12]

$$RE = \frac{\varphi_T}{I_e}. \quad (3)$$

Перейдемо до аналізу утиснення, тобто підсилення навпаки, синфазного сигналу. Це підсилення має бути значно менше одиниці,

тому його і називаємо терміном «утиснення». Ідеальний ДП взагалі не чутливий до синфазного сигналу в межах робочого діапазону.

Результати аналізу впливу синфазного сигналу дозволять визначити наскільки сильніший вплив диференційного сигналу порівняно з синфазним.

Приблизний розрахунок диференційного підсилювача на утиснення синфазного сигналу (завади) виконується за схемою включення з уніполярним живленням, рис.38. Сенс такого переходу від біполярного до уніполярного проясниться пізніше. Розрахунок виконується таким чином.

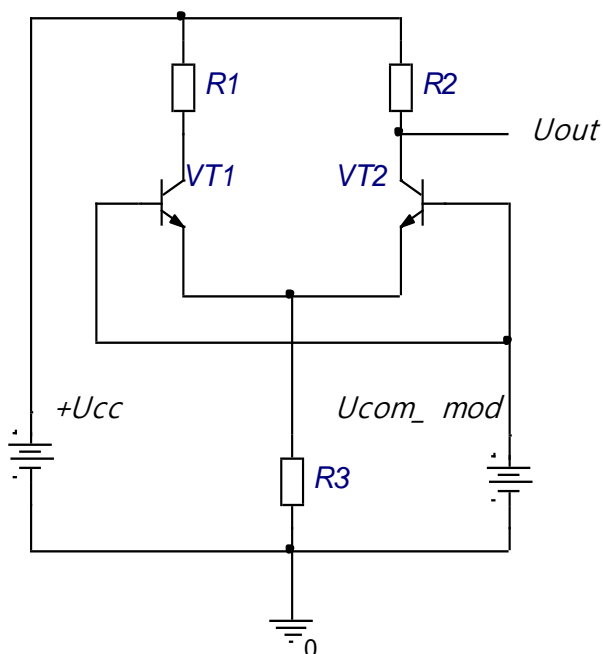


Рис.38. Підсилювач в схемі аналізу утиснення

1. Через те, що за синфазним сигналом входи підсилювача для розрахунку за постійним струмом закорочені, рис.27, то в цій схемі емітери спільні і бази спільні. Отже і струми колекторів однакові. Тоді ліпше перейти до еквівалентної схеми, рис.28, де транзистори V1 та V2 представлені одним VT1, удвічі потужнішим. Але потужність зараз не цікавить. Переходимо до аналізу схеми, Рис.28. В цій схемі емітер відокремлений від землі не лише власним опором за формулою (3), а ще й резистором в ролі генератора струму $R_g = R3$.

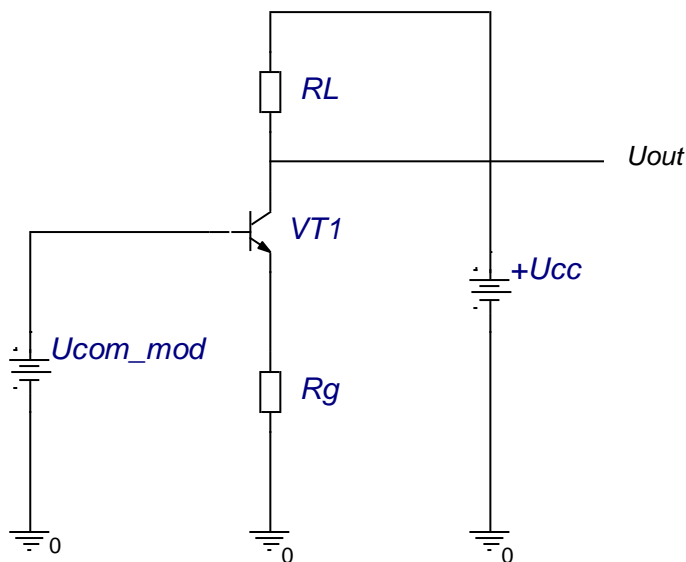


Рис.39. Еквівалентна схема для аналізу впливу
синфазного сигналу

Отже, до цієї схеми (ось мета переходу до схеми з уніполярним живленням) за подобою формули (2) можна зразу записати коефіцієнт підсилення синфазного сигналу, як

$$K_{cc} \approx \frac{RL}{2Rg} \quad (4)$$

Знак приблизно вказує на те, що у формулі (4) в знаменнику не враховано динамічний опір емітера RE , бо він багато менший ніж опір джерела струму Rg . Але чому ми можемо так записати? Аналізуємо іншим шляхом.

2. Повернемось до схеми, Рис.38. Напруга на емітерах кремнієвих транзисторів $VT1$ та $VT2$, Рис.27, дорівнює $U_{com_mod} - 0,7\text{ В}$.

$I = (U_{com_mod} - 0,7\text{В}) / R3$, де $0,7\text{В}$ – приблизне значення напруги база-емітер транзисторів $VT1$ та $VT2$ для режиму підсилення. Такий режим зазвичай має місце, бо резистор $R3 = Rg$ створює **сильний від'ємний зворотний зв'язок**. Цей струм розділяється навпіл і через кожен транзистор тече за формулою Шоклі однаковий струм $I_{V1} = I_{V2} = I/2$, бо напруга база-емітер однакова для кожного транзистора.

3. При зміні напруги на вході на ΔU_{com_mod} струм через транзистори зміниться на $\Delta I = \Delta U_{com} / (2R3)$. Напруга база-емітер

транзисторів при цьому майже не зміниться, бо вона впливає на струм за експоненціальним законом (формула Шоклі).

4. Тоді на колекторах транзисторів зміна напруги буде дорівнювати $\Delta U_{out} = \Delta I R_2 = \Delta U_{com} R_2 / (2R_3)$.

5. Відношення вихідного сигналу до вхідного характеризує підсилення (утиснення) синфазного сигналу $K_{cc} = \Delta U_{out} / \Delta U_{com} = R_2 / (2R_3)$.

6. Висновок: для наближення підсилювача, Рис.38, до ідеальної характеристики за синфазним сигналом має бути $R_g = R_3 \rightarrow \infty$.

7. Перевірка. Потрібно перевірити, яка напруга на колекторах транзисторів.

$U_{out} = U_{cc} - I R_2$. Ця напруга має бути більша, ніж вхідна U_{com_mod} , бо інакше транзистор попаде в ключовий режим, що не має підсилення.

Зауваження: в деяких виданнях формула для розрахунку коефіцієнта утиснення синфазного сигналу надається як відношення коефіцієнта підсилення диференційного до коефіцієнта підсилення синфазного сигналу. Аналіз технічної документації на операційні підсилювачі світових виробників операційних підсилювачів однозначно вказує що коефіцієнт CMRR надано як відношення лише вхідного сигналу до вихідного в режимі, коли входи схеми закорочені спеціальною схемою вимірювання. Подробиці – на старших курсах.

10.9. Диференційний підсилювач з генератором струму

Дещо складніший підсилювач із генератором (джерелом) струму наведено на рис.40. Такий підсилювач з генератором струму є типовим

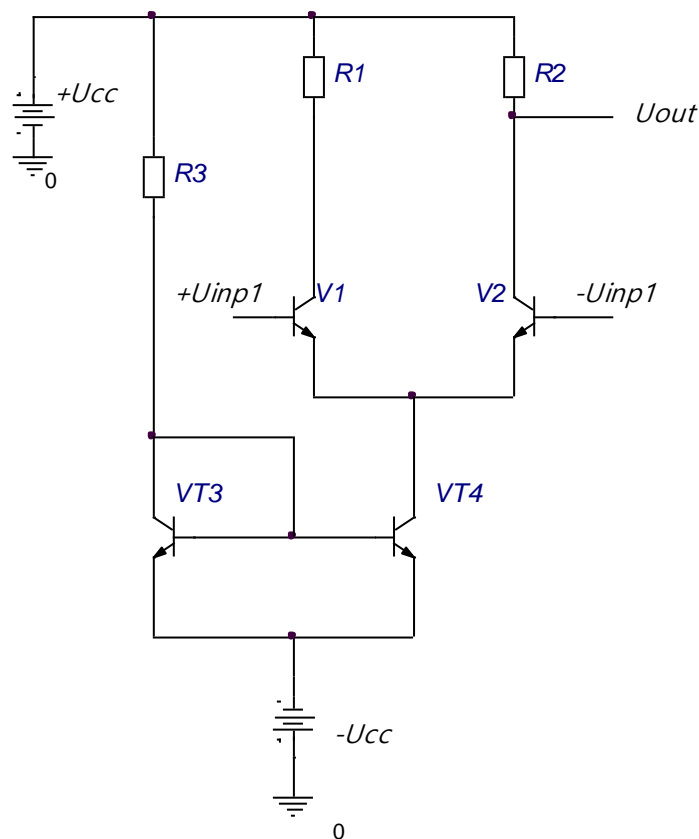


Рис.40 Диференційний підсилювач з генератором струму

вхідним каскадом до операційного підсилювача (ОП). Робочий режим за постійним струмом задає резистор R3. Через нього протікає струм I_g , що визначається розмахом напруги обох джерел живлення за винятком напруги на одному переході база-емітер транзистора VT3. Вважаємо, що приблизно 0,7 В. Тоді

$$I_g = \frac{(+U_{CC}) + (-U_{CC}) - 0,7 \text{ В}}{R3}$$

Через транзистор VT4 за формулою Шоклі протікає такий самий струм, що ділиться навпіл транзисторами V1 та V2, бо в них також в мало сигнальному режимі приблизно однакові напруги база-емітер. Але вихідний опір R_g транзистора VT3 дуже великий і сягає десятків мегом.

Аби зменшити кількість джерел живлення і набути досвіду роботи з віртуальною землею перейдемо до уніполярного живлення за схемою рис.41. Рівень віртуальної землі дорівнює половині рівня напруги джерела живлення $+U_{CC}$.

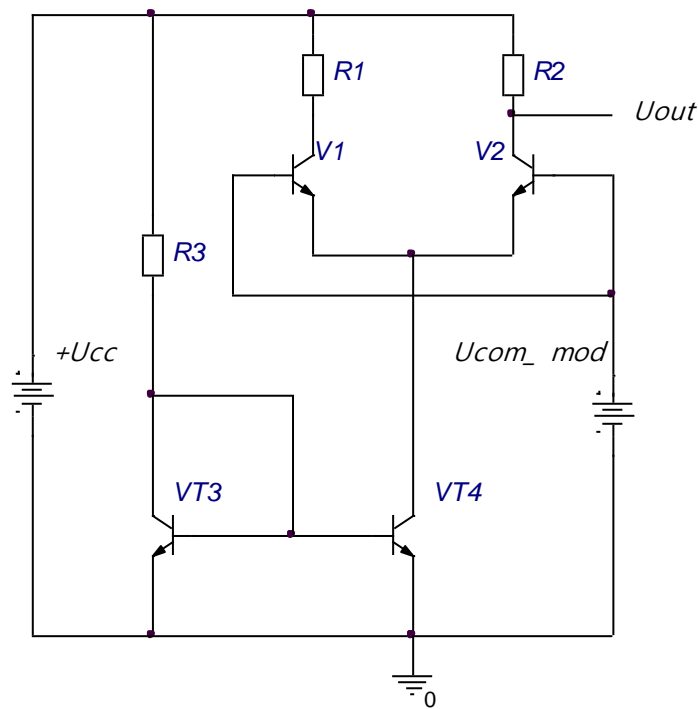


Рис.41. Підсилювач з генератором струму в схемі аналізу утиснення синфазного сигналу

Розрахунок підсилювача з генератором струму за схемою, рис.30:

1. Струм через резистор $R3$ дорівнює $I = (U_{cc} - 0,7V) / R3$, де $0,7\text{ В}$ – приблизне значення напруги база-емітер транзистора $VT3$.
2. Напруга база-емітер для транзистора $VT4$ така сама, як і для $VT3$, тож і струм через $VT4$ буде йти такий самий, як і через $VT3$. (Ефектом Ерлі поки що нехтуємо).
3. Вихідна напруга $U_{out} = U_{cc} - IR2$. Ця напруга має бути більша, ніж вхідна U_{com_mod} , бо інакше транзистори $VT1$ та $VT2$ попадуть в ключовий режим, що не має підсилення.
4. Вихідна напруга U_{out} в цьому випадку не залежить від вхідної напруги U_{com_mod} , тому такий підсилювач був би ідеальним, якби не впливав ефект Ерлі – проявляється залежність струму через транзистор $VT4$ від напруги на його колекторі, що дорівнює $U_{com_mod} - 0,7\text{В}$, а отже змінюється синхронно з вхідною напругою. Тому такий підсилювач не ідеальний, але на декілька порядків ліпше, ніж той, що на рис.26, тому він лежить в основі вхідних каскадів операційних підсилювачів.

10.10. Операційний підсилювач

Операційні підсилювачі (ОП) складають основу аналогових частин вимірювальної апаратури. Вхідні каскади РП зазвичай складені з ДП. Але ДП, навіть з генератором струму, рис.9, має істотне обмеження: його вихідний сигнал не може бути нижчим, ніж вхідний. Бо тоді він втратить підсилення. Для подолання цього обмеження до диференційного підсилювача додають вихідний каскад. Цей каскад проектується таким чином, аби він сприймав вихідний сигнал ДП, підсилював його та надавав йому широкого розмаху – бажано від живлення позитивної полярності до живлення негативної полярності. Тоді отримуємо операційний підсилювач. Зараз різними виробниками випускаються тисячі варіантів операційних підсилювачів. Не у всіх вихідна напруга може змінюватися від живлення позитивної полярності до живлення негативної полярності. Такими можливостями володіють лише сучасні ОП класу Rail-to-Rail за виходом. Існують ОП класу Rail-to-Rail за входом, а також існують ОП класу Rail-to-Rail одночасно і за виходом і за входом.

Основні параметри операційного підсилювача:

1. Коефіцієнт підсилення диференційного сигналу – відношення прирощення вихідного сигналу до прирощення вхідного диференційного сигналу.
2. Струм живлення.
3. Напруга живлення мінімальна та максимальна.
4. Вхідні струми та їх різниця.
5. Максимальна та мінімальна вихідна напруга.
6. Електрорушійна сила (ЕРС) зміщення входу
7. Коефіцієнт усунення впливу джерела живлення – відношення прирощення вихідного сигналу до прирощення напруги відповідного джерела живлення.

8. Коефіцієнт усунення впливу синфазного сигналу – відношення прирощення вихідного сигналу до прирощення синфазного сигналу – напруги на закорочених входах операційного підсилювача. (Фактично вимірювання йде за допомогою додаткового вимірювального підсилювача).
9. Частота одиничного підсилення.
10. Запас за фазою.
11. Швидкодія.
12. Температурний діапазон і т.д.

Класифікація ОП має різновиди:

За технологією:

- Біполярні, що історично з'явилися найпершими у вигляді мікросхем
- з JFET на вході, де: JFET – польовий транзистор, де затвор – керуючий р-n-перехід. Наприклад, ОП AD820, AD822.
- на комплементарних МОН-транзисторах.

За входом: симетричний чи відносно полюсу джерела живлення

За виходом: на емітерних повторювачах, з колекторним виходом.

За живленням: з уніполярним живленням, з біполярним живленням.

За потужністю та споживанням: мікропотужні – призначені для використання при малих та надмалих струмах, деякі зразки працюють за робочим струмом 50 нА;

За частотою одиничного підсилення: вузькополосні (до 1 МГц) та широкополосні – з високою частотою одиничного підсилення декілька десятків і навіть сотень МГц.

За швидкістю наростання вихідної напруги і т.д.

За параметрами ОП спостерігається надзвичайно великі розбіжності.

Підсилення сучасних ОП сягає 10000-1000000. ОП – нелінійний елемент, але завдяки великому підсиленню та зовнішнім елементам зворотнього зв'язку він має змогу автоматично балансуватись, вводячи цим самим в лінійний режим загальну схему.

Вхідні струми – від одиниць мікроампер до одиниць пікоампер

Полоса одиничного підсилення від мегагерца до десятків мегагерц.

Електрорушійна сила зміщення входу від 5 мВ до 25 мкВ.

Вибір операційного підсилювача для схеми вимірювання має свої особливості.

При виборі ОП для метрологічних потреб потрібно керуватися наступним:

1. Полоса одиничного підсилення має бути мінімальна. Це убезпечить від можливого збудження ОП та спростить схему включення.
2. Електрорушійна сила зміщення за входами має бути в межах допустимої похибки. Чим менше – тим краще. Але і ціна росте з підвищенням точності. Бо зменшення ЕРС за входами потребує налаштування. А це – коштовна технологічна операція. Приблизний підрахунок свідчить: при збільшенні точності вимірювальної апаратури удвічі, ціна росте на порядок.
3. Вхідні струми повинні бути настільки малі, наскільки потрібен великий вхідний опір. Не слід захоплюватись надмалими вхідними струмами: чим менші вхідні струми, тим, зазвичай, більші шуми в ОП.
4. Швидкодія має бути мінімально необхідною. Чим більша швидкодія, тим більше струм споживання і більше вірогідність нестабільності.
5. Запас за фазою має бути максимальним в класі подібних ОП. Чим більше запас за фазою, тим менше вірогідність збудження при варіації навантаження.

6. Звертати увагу на струм споживання в залежності від напруги живлення. В належно спроектованих ОП та виготовлених на гарній технологічній лінійці ця залежність мінімальна.
7. Ціна має бути мінімальна. Мінімальна ціна відповідає масовому виробництву з стабільною повторюваністю та надійністю компонентів.
8. Рівень шуму має бути в заданих межах.
9. При розробці схеми включення передбачати елементи розв'язування в колі живлення.

11. Схеми перетворення та вимірювання

Переважає більшість цифрових приладів містять аналого-цифрові перетворювачі (АЦП), в яких вхідний сигнал – напруга. Тому в метрології існує ціла галузь схем для перетворення електричних та неелектричних сигналів в напругу.

11.1. Перетворення значення струму в напругу

Є істотна відмінність між вимірюванням напруги та струму. Адже вимірювач струму включається повністю в розрив кола і має утворити такі умови, наче вимірювача в колі немає. Тобто він включається в коло вимірювання послідовно. Друга відмінність полягає в тому, що аби надати результат вимірювання до аналого-цифрового перетворювача (АЦП), то його потрібно перетворити в напругу, та ще й у такому форматі, аби не втратити значну частину вхідного діапазону АЦП. Діапазон струмів, що цікавить радіоелектроніку надзвичайно широкий. Від фемтоампер до кіло ампер. Оскільки ми вивчаємо лише основи метрології, то обмежимося тільки тими вимірюваннями, що вкладаються в діапазон від наноампер до ампер. Все інше відкладемо до старших курсів. А для вимірювання напруги досить застосувати сучасні підсилювачі і проблеми на цьому в основному і закінчуються.

Отже, сучасний підхід до вимірювання струму полягає в створенні нульового вхідного опору, попередньому перетворенні струму в пропорційну напругу для подальшого застосування аналого-цифрового перетворювача (АЦП), виведення результату на цифрове табло, індикатор тощо.

11.2. Найпростіший перетворювача струм-напруга

Якщо потрібно виміряти струм, що протікає до землі, то схема перетворювача струм-напруга містить лише операційний підсилювач (ОП) та резистор зворотнього зв'язку [13], рис.42. Доведемо це твердження. В ОП вхід, що не інвертує, підключено до землі. Вихід ОП та його вхід, що інвертує замкнено через резистор. Таке включення гарантує автоматичне балансування ОП таким чином, що різниця напруги між входами не перевищує похибки в розмірі ЕРС зміщення

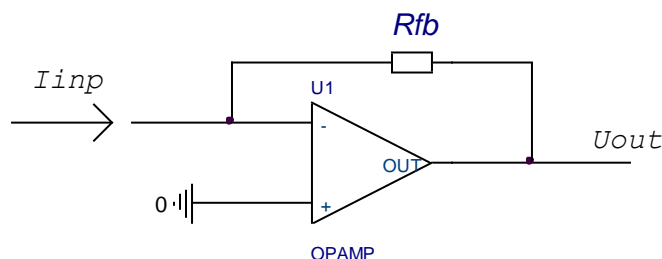


Рис.42.Перетворювач струму до землі в напругу

за входами. Дійсно, якщо на вході, що інвертує виникає надлишковий струм ΔI_{inp} , то, за визначенням, вхідні струми ОП прагнуть до нуля, між входами напруга U_{inp} прагне до нуля за рахунок автобалансування. Тоді на вході, що не інвертує, маємо також потенціал землі з похибкою в межах ЕРС зміщення за входами. Через зворотній зв'язок

на виході мусить виникнути надлишкова напруга ΔU_{OUT} , аби компенсувати надлишковий струм з похибкою $1/K_U$, де K_U – коефіцієнт підсилення диференційного сигналу. Зазвичай $K_U > 10^4$, тож і похибка мала. Зауважимо, що для цієї схеми рівень синфазного сигналу

дорівнює нулю за визначенням, бо вхід, що не інвертує – заземлений. Отже маємо простий перетворювач струм-напруга, де вихідна напруга утворюється за законом Ома $U_{OUT} = - I_{inp} R_{fb}$. Саме ця напруга з мінусовим знаком забезпечить нульову напругу між входами ОП, бо струм, що тече до входу має сплинути на мінусовий потенціал виходу ОП. Інакше порушиться балансування. А такого не може бути за 100% від'ємним зворотнім зв'язком, що маємо у цій схемі.

Для побудови універсальної схеми вимірювання струму нам будуть потрібні масштабні підсилювачі напруги.

11.3. Схема масштабного підсилення напруги на операційному підсилювачі

Для виконання операцій з аналоговим сигналом та вимірювання малих рівнів напруги, наприклад, мілівольтів, проводять підсилення сигналу для того, щоб максимально корисно використати діапазон роботи АЦП, який зазвичай розрахований на вольти. Існують мінімум два найважливіші варіанта виконання. Перший – що інвертує вхідний сигнал, другий – ні. Найпростіший варіант підсилювача, що інвертує, тобто змінює знак вихідної напруги порівняно зі вхідною, наведено на рис.43 [13].

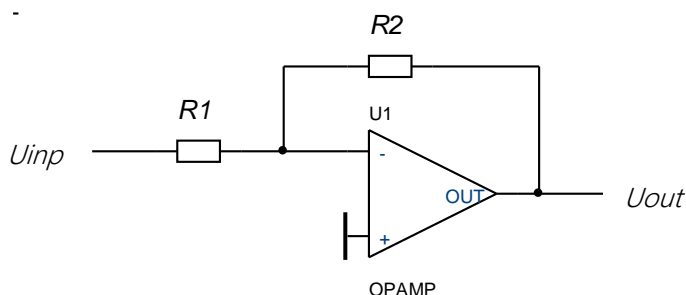


Рис.43. Масштабний підсилювач напруги з зміною знаку

В ОП вхід, що не інвертує, підключено до землі. Вихід ОП та його вхід, що інвертує замкнено через резистор $R2$. Таке включення $R2$

гарантує автоматичне балансування ОП таким чином, що різниця напруги між входами не перевищує похибки в розмірі ЕРС зміщення за входами. Дійсно, якщо на резисторі $R1$ виникає напруга U_{inp} , то, за визначенням, вхідні струми ОП прагнуть до нуля, між входами напруга ΔU_{inp} прагне до нуля за рахунок автобалансування. Тоді на вході, що не інвертує, маємо також потенціал землі (віртуальної) з похибкою в межах ЕРС зміщення за входами. Через зворотній зв'язок на виході мусить виникнути напруга U_{OUT} , аби компенсувати вхідну напругу з похибкою $1/K_U$, де K_U – коефіцієнт підсилення диференційного сигналу з урахуванням масштабу підсилення. При зростанні підсилення росте похибка. Зазвичай залишкове підсилення $K_{U3} > 10^3$, тож і похибка мала. Зауважимо, що для цієї схеми рівень синфазного сигналу дорівнює нулю за визначенням, бо вхід, що не інвертує – заземлений. Оскільки струм в умовах авто балансування через обидва резистора протікає однаковий і складає $I = U_{inp} / R1$. Вихідна напруга U_{OUT} утворюється за законом Ома $U_{OUT} = IR2$. Отже, підставимо значення струму і маємо простий підсилювач напруги, де вихідна напруга

$$U_{OUT} = - U_{inp} R2 / R1. \quad (5)$$

Саме ця напруга з мінусовим знаком забезпечить нульову напругу між входами ОП, бо струм, що тече до входу, має сплинути на мінусовий потенціал виходу ОП. Інакше порушиться балансування. А такого не може бути за 100% від'ємним зворотнім зв'язком, що маємо у цій схемі.

11.4. Масштабний підсилювач напруги без зміни знаку

Масштабний підсилювач напруги без зміни знаку наведено на рис. 12 [13]. Ця схема також забезпечує автоматичне балансування ОП за рахунок замикання виходу на вхід, що інвертує, через резистор $R2$.

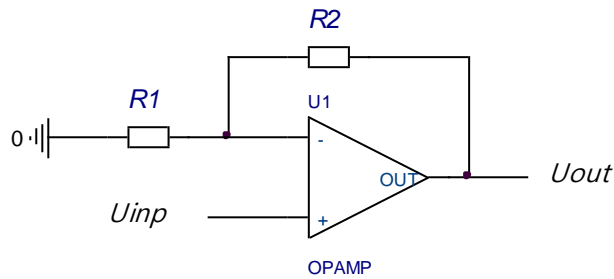


Рис.44. Масштабний підсилювач напруги без зміни знаку

Тоді в на вході, що інвертує також утвориться потенціал U_{inp} . Приймавши в останньому аргументацію до попередньої схеми легко отримаємо

$$U_{OUT} = U_{inp} (1 + R2 / R1).$$

Отже, висновки такі:

1. Вхідна напруга в цій схемі слугує синфазним сигналом. Це погіршує умови роботи ОП.
2. Коефіцієнт підсилення більший на одиницю.
3. Знак вихідної напруги співпадає зі знаком вхідної.

Ці ознаки дають змогу побудувати вимірювальний підсилювач на одному ОП.

11.5. Вимірювальний підсилювач.

Навіть найдосконаліші ОП не здатні повністю задовольнити запити метрології по утисненню синфазних завад та синфазних сигналів. Тому для підвищення якості вимірювальних схем спеціально був розроблений так званий вимірювальний, він же інструментальний, електрометричний, клас підсилювачів. Найпростіший з них містить один ОП в диференціальному включенні рис.45 [13]. При виконанні умови $R1 / R2 = R3 / R4$ посилення диференціального сигналу набагато більше посилення синфазного сигналу і коефіцієнт ослаблення синфазного сигналу (КОСС) буде максимальним.

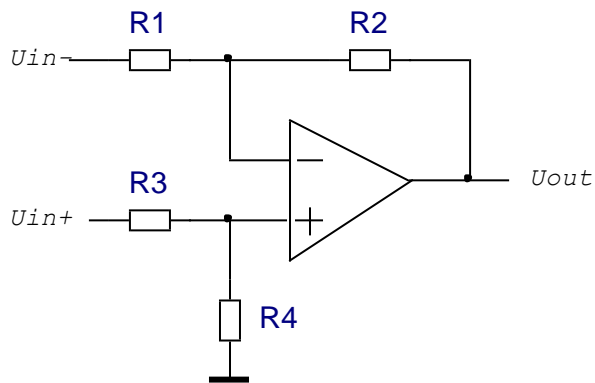


Рис.45. Найпростіший вимірювальний підсилювач

Диференціальний коефіцієнт посилення при виконанні зазначеного вище умови

$$K_d = \frac{U_{out}}{(U_{in+}) - (U_{in-})} = \frac{R_2}{R_1} \frac{1}{1 + \frac{R_2}{R_1 K_u}}$$

Коефіцієнт посилення за входом V_{in-} складає $K_{u-} = -R_2/R_1$. Відповідно коефіцієнт посилення за входом V_{in+} складає $K_{u+} = R_2/R_1 + R_3/(R_3 + R_4)$. Якщо всі резистори однакові за опором, то зрозуміло, що за умови, коли підсилювання ОП $K_u \rightarrow \infty$, посилення всієї $K_d \rightarrow 1$ і маємо **схему віднімання**.

Частка коефіцієнту посилення синфазного сигналу, що обумовлена неузгодженістю резисторів, дорівнює

$$K_{сф1} = \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_1 (R_3 + R_4)}$$

Частка коефіцієнту посилення синфазного сигналу схемою, що обумовлена кінцевим значенням КОСС операційного підсилювача, дорівнює

$$K_{сф2} = \frac{R_2}{R_1 * КОСС}$$

Коефіцієнт посилення синфазного сигналу схемою загалом

$$КОСС = K_d / (K_{сф1} + K_{сф2}).$$

Основна проблема в розглянутому вимірювальному підсилювачі – відносно малий вхідний опір, що визначається номіналами вхідних резисторів.

Структуру вимірювального підсилювача на двох ОП розглядати не будемо, а зразу перейдемо до вимірювального підсилювача на трьох ОП. Це логічно, бо ми додамо лише по буферному підсилювачу на кожен вхід, аби додати вхідного опору. Заодно додамо підсилення за рахунок співвідношення резисторів і отримаємо вимірювальний підсилювач, що став класичним схемотехнічним рішенням, рис.46 [13].

Параметри:

1. Високий вхідний опір забезпечується малим вхідним струмом ОП, бо будь-які резистори до входу, що не інвертує – не підключені.

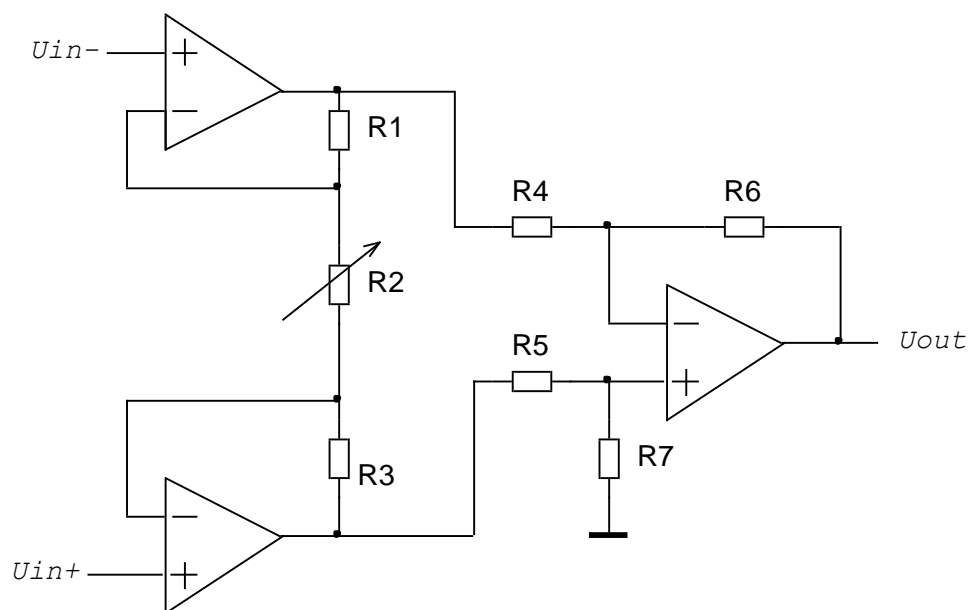


Рис.46. Вимірювальний підсилювач на трьох ОП

2. Підсилення визначається співвідношенням резисторів, що балансують ОП– R1, R3 та резистором R2: $K_u = (1 + 2 R_2 / R_1)$.
3. Характеристики за синфазним сигналом визначаються схемою віднімання, що розглянута вище.

Якщо зробити для резисторів з однаковим номіналом однакові позначення, рис.47, то аналіз схеми спроститься. Коефіцієнт підсилення схеми

$$K_u = (1 + 2 R_2 / R_1).$$

Такий підсилювач простіший у виготовленні у вигляді інтегральної мікросхеми (ІМС).

Розглянутих схем підсилювачів досить, аби побудувати універсальну схему вимірювання струму.

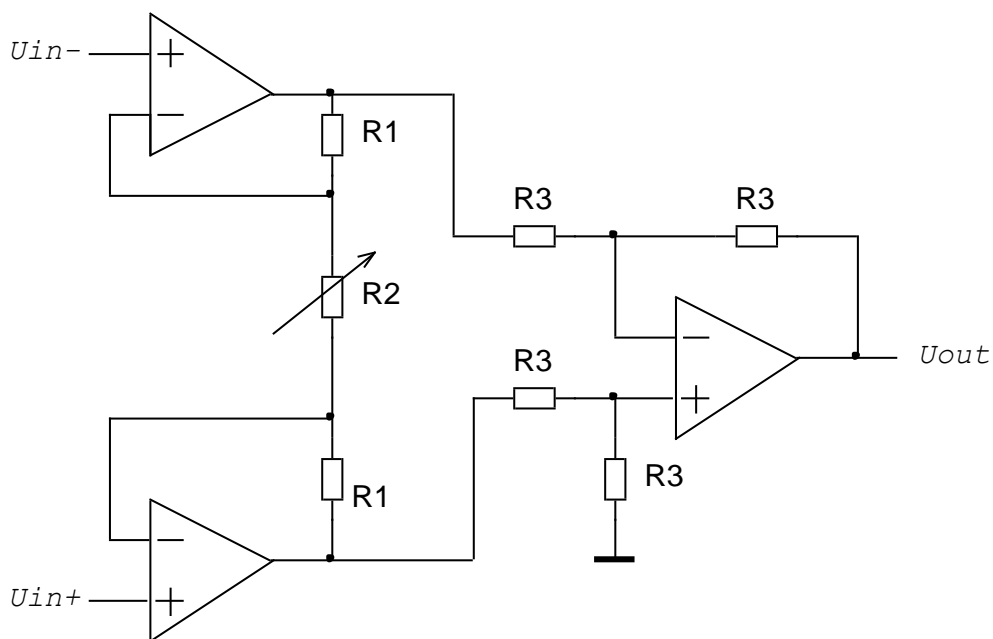


Рис.47.Поширений вимірювальний підсилювач у вигляді інтегральної мікросхеми.

11.6. Універсальна схема вимірювання струму

Ця схема [13] не залежить від того, в якому місці її підключать для вимірювання струму, рис.48.

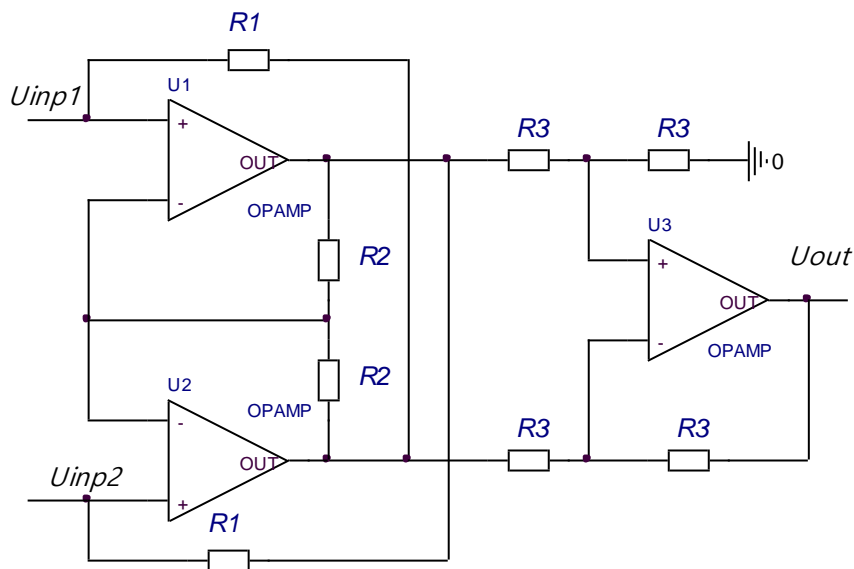


Рис.48.Універсальна схема вимірювання струму

Схема містить входні перетворювачі струм-напруга на ОП $U1$ та ОП $U2$. Результат вимірювання формує схема віднімання на ОП $U3$.

Автобалансування входних перетворювачів струм-напруга на ОП $U1$ та ОП $U2$ забезпечують резистори $R2$. Цим гарантується, що між входами ОП напруга буде дорівнювати нулю. Отже входи утворюють ділянку з нульовим падінням напруги, яка не утворить розриву у колі вимірювання. Резистори $R1$ забезпечують формування напруги, яка пропорційна добутку струму на опір резистора. Включення резистора до виходу протилежного ОП забезпечує інверсну напругу, що виникає для компенсації струму, що втікає. Нарешті схема віднімання дає кінцевий результат для струмів, бо коли верхній ОП $U1$ підключений до струму, що втікає, то для нижнього ОП $U2$ струм буде таким, що витікає.

Схема є стабільною, бо зворотні зв'язки для ОП $U1$ та ОП $U2$ є від'ємними.

11.7. Перетворення змінної напруги в постійну

Аналого-цифрові перетворювачі на вході мають мати постійну напругу. Для того, щоб перетворити змінну напругу в постійну потрібно

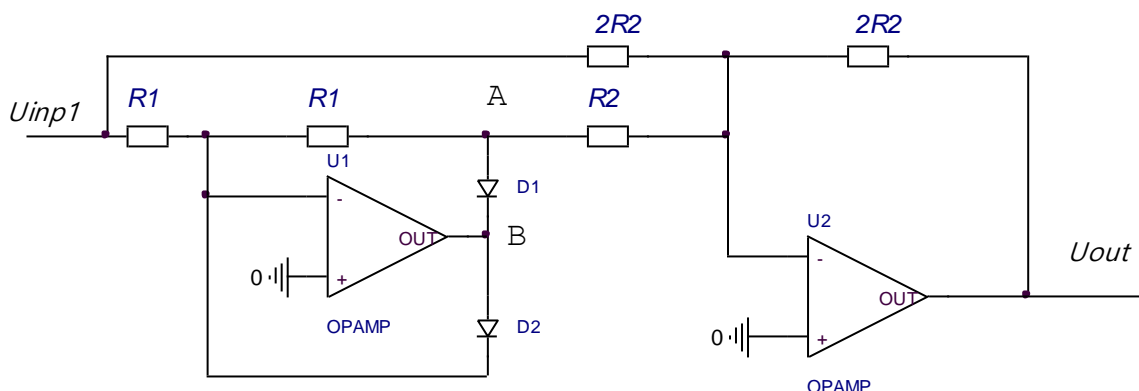


Рис.49. Перетворювач струму в напругу

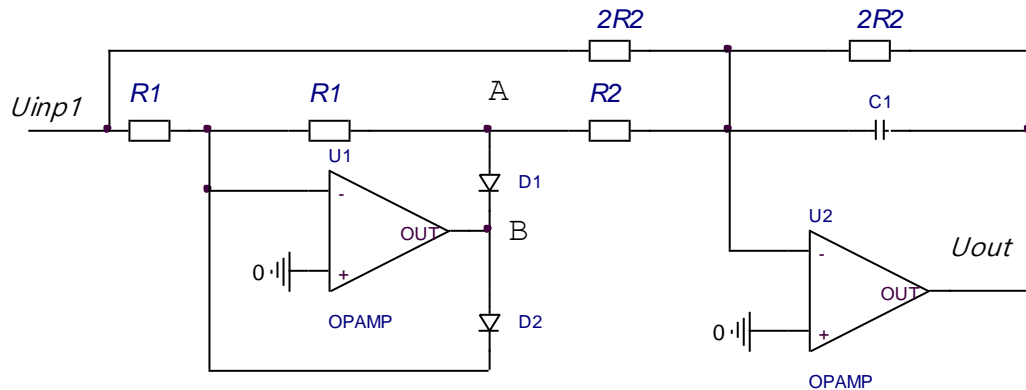
Перетворювач містить детектор на ОП U1 та аналоговий суматор на ОП U2.

Коли на вході U_{inp1} напруга позитивна, то на виході В суматора напруга негативна. Завдяки цьому діод D2 закритий, а D1 – відкритий. Якщо опір резисторів, що позначені як R1, більше ніж еквівалентний опір діоду D1, то в точці А маємо напругу за рівнем таку ж як вхідна і протилежну за знаком. Ця напруга підсилюється удвічі і з протилежним знаком проходить на вихід суматора U_{out} . Сюди ж надходить інверсне значення вхідної напруги. В сумі маємо на виході U_{out} такий самий сигнал, як на вході.

Коли ж на вході U_{in1} напруга негативна, то на виході В суматора напруга позитивна. Завдяки цьому діод D1 закритий, а D2 – відкритий. В цьому разі ОП1 охоплений 100% негативним зворотнім зв'язком, ОП U1 перебуває в режимі повторювача напруги. Але ж на вході його напруга дорівнює нулю, бо вхід, що не інвертує, заземлено. Тому в точці А маємо нульову напругу. Ця напруга, а точніше похибка нуля, підсилюється удвічі і з протилежним знаком проходить на вихід суматора U_{out} . Сюди ж надходить інверсне значення вхідної напруги. В сумі маємо на виході U_{out} такий самий сигнал, як на вході.

Отже, перетворювач передає на вихід лише позитивний рівень сигналу.

Аби профільтрувати сигнал, включають додатковий конденсатор $C1$, рис. 50 [13].



Така с~~х~~Рис.50. Перетворювач струму в напругу з фільтрацією тершого
порядку.

11.8. Повторювач на ОП

Важливу функцію виконує ОП з одиничним коефіцієнтом підсилення, що показує рис.51 [13]. Таке включення ОП називається повторювачем вхідної напруги.

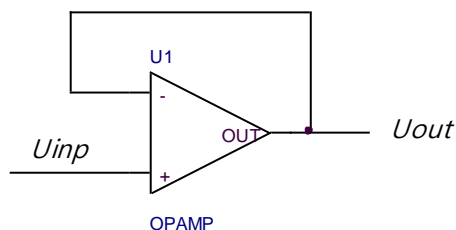


Рис.51. Повторювач напруги

Дійсно, ОП охоплено 100% негативним зворотнім з'язком. Отже ОП знаходиться весь час в збалансованому стані. Тонкощі – на старших курсах. Різниця напруги між входами дорівнює нулю з похибкою, що не перевищує ЕРС зміщення за входами. З цього виходить, що напруга на виході і на вході – однакова. Слід зауважити, що за цією найпростішою схемою включення стоїть найважчий режим

роботи ОП, бо він відпрацьовує по суті синфазний сигнал. Розробники ОП не радять перевищувати діапазон ± 10 В вхідного сигналу при живленні ± 15 В для ординарних ОП.

11.9. Пристрій вибірки та зберігання

За принципом включення ОП в якості повторювача напруги будується пристрій вибірки та зберігання (ПВХ). Для побудови пристрою додається ключ, що вимакється коротким імпульсом з частотою максимальної стабільності. Нестабільність частоти породжує таке явище як джиттер – «тремтіння». Джиттер погіршує роздільну здатність АЦП, на який направляється вихідний сигнал ПВХ. Найпростіший варіант ПВХ наведено на рис.52 [13].

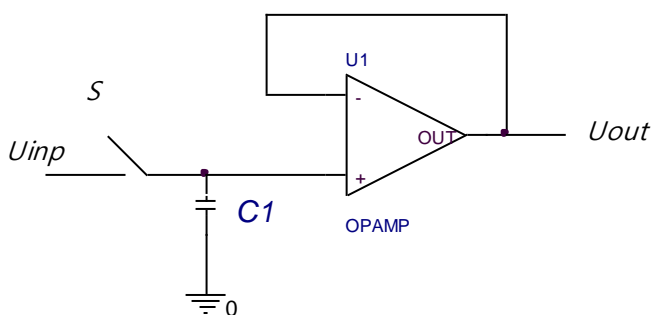


Рис.52. Схема пристрою вибірки та зберігання

Ключ S замикає на короткий час ємність $C1$ до входу і вона швидко заряджається від джерела вхідної напруги. Надалі цей рівень зберігається впродовж заданого часу майже незмінним. Струми розряду обумовлені матеріалами та принципом дії ОП: ОП на біполярних транзисторах принципово має мати ненульовий струм бази вхідного ДП. Цей струм обов'язково буде розряджати ємність $C1$.

12. Цифро-аналогові перетворювачі

Цифро-аналогові перетворювачі [14-18] (ЦАП) – це пристрої, що дозволяють цифровий код перетворити за заданим алгоритмом у

відповідну напругу чи струм. ЦАП сам по собі в метрології відіграє певну роль. Але важливіше те, що саме ЦАП є обов'язковою складовою багатьох аналого-цифрових перетворювачів. Отже вивчення АЦП слід починати з вивчення ЦАП. Архітектура ЦАП дуже різноманітна. Класифікація цифро-аналогових перетворювачів за схемотехнічними принципами наведена на рис. 53 [15-16]. Зараз ЦАП виконують у вигляді інтегральних мікросхем (ІМС). Вони розрізняються побудовою за наступними ознаками:

- За видом вихідного сигналу: струм чи напруга
- За типом цифрового інтерфейсу: з послідовний чи паралельний

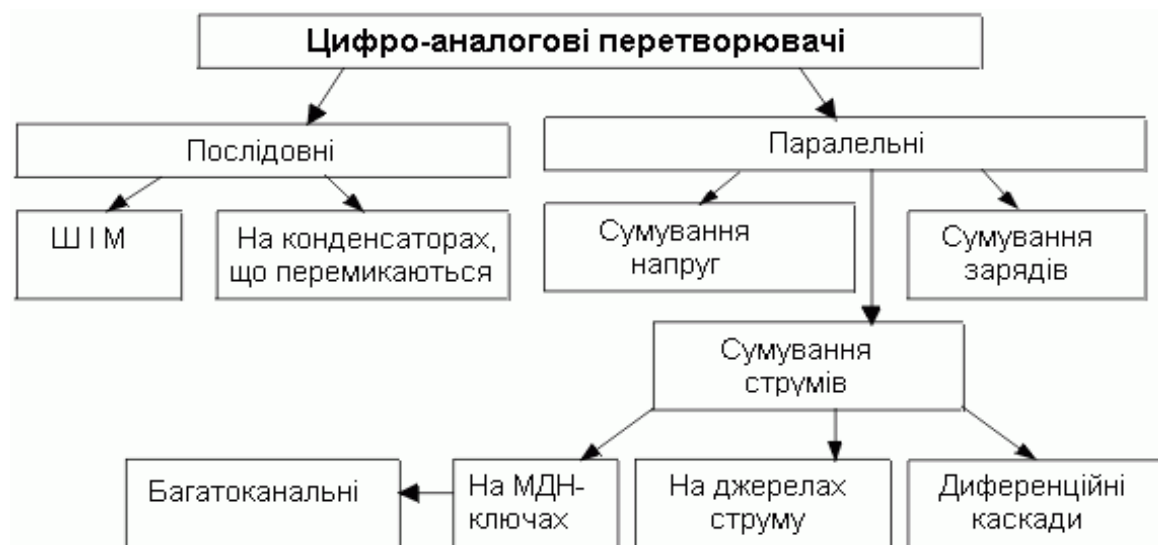


Рис.53. Різновиди ЦАП

- За кількістю ЦАП на кристалі: одноканальні та багатоканальні
- За швидкодією: середньої чи високої

Інші варіанти побудови: послідовні ЦАП, ЦАП з широтно-імпульсною модуляцією, з перетворювачами напруга – частота та інші.

В багатьох випадках ЦАП входить у склад ІМС мікроконтролерів.

12.1. ЦАП на основі широтно-імпульсної модуляції

Якщо не потрібна висока швидкодія, цифро-аналогове перетворення може бути здійснене за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Принцип дії ЦАП з ШІМ наведено на рис.54 [15-16].

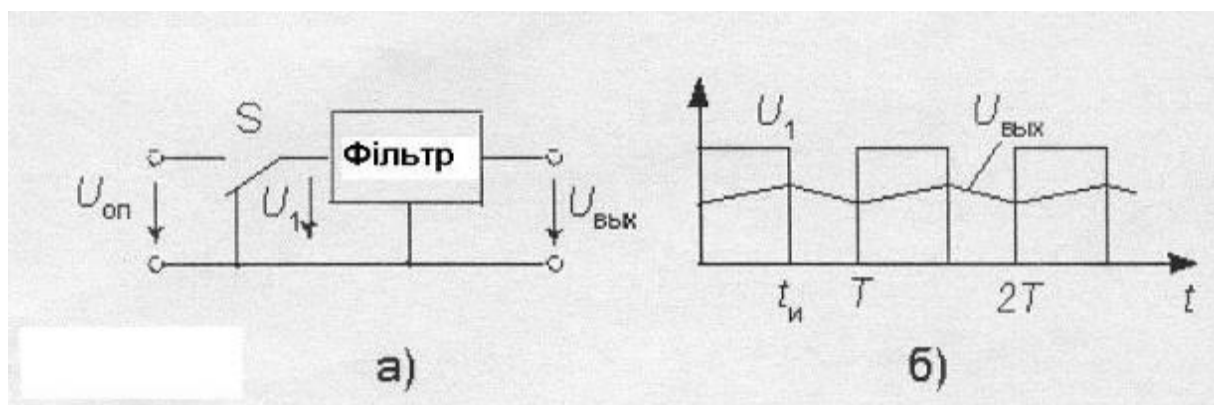


Рис.54. а) Схема послідовного ЦАП; б) діаграма напруг.

На рис.20-а наведена спрощена структура послідовного ЦАП, в якому ШІМ-модулятор керує роботою ключа S . В залежності від коду керування формується вихідний імпульс, тривалість якого відповідає значенню цифрового коду. Часова діаграма наведена на рис.20-б. Схема формування коду модулятора наведена на рис.55 і містить лічильник та схему порівняння кодів. Код на виході лічильника лінійно зростає з кожним імпульсом тактової частоти $F_{такт}$. Поки цей код менший за двійковий код, на виході зростає напруга ШІМ [15].

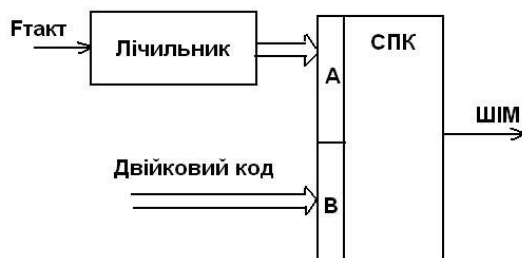


Рис.55. Схема формування коду

Схеми порівняння кодів (СПК) буде сигнал логічної одиниці. Як тільки код лічильника зрівнюється з двійковим кодом, на виході СПК встановлюється логічний нуль. Цей імпульс керує ключем S . Фільтр у

схемі рис.20-а потрібен для виділення середнього значення напруги. Сигнал на виході фільтра показано на рис.20-б. Така архітектура забезпечує високу лінійність перетворення коду в напругу і не потребує для реалізації точних елементів. До недоліку можна віднести порівняно низьку швидкодію.

12.2. ЦАП на конденсаторах, що перемикаються

В сучасних міросхемах ЦАП виконуються в основному на спеціальних ланцюгах – конденсаторах, що перемикаються [15-16]. Існує спеціальний математичний апарат, що дозволяє ставити у відповідність резисторам спеціальні схеми з ключами та конденсаторами. Є також і спрощені процедури перетворення на конденсаторах.

Наприклад, як це показано в схемі рис.56. В цій схемі

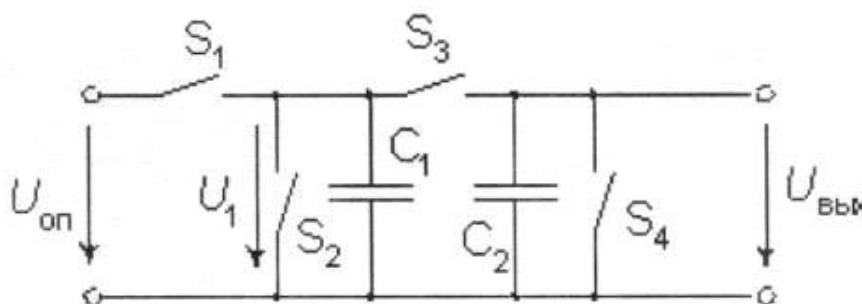


Рис.56. Схема ЦАП на конденсаторах, що перемикаються.

ємності конденсаторів C_1 та C_2 рівні. Перед початком перетворення цифрового коду в напругу конденсатор C_2 розряджається ключем S_4 . Вхідний двійковий код вводиться послідовно, починаючи з молодшого розряду d_0 . Кожен такт перетворення складається з двох половинних тактів. Якщо $d_0=1$, то у першому напівтакті конденсатор C_1 заряджається до опорної напруги $U_{оп}$ за допомогою замикання ключа S_1 . Коли ж $d_0=0$, то розряджається до нуля за допомогою замикання ключа S_2 . На другому напівтакті при розімкнутих ключах S_1 , S_2 та S_4 замикається ключ S_3 , що викликає ділення заряду навпіл між C_1 та C_2 .

12.3. Паралельні ЦАП

ЦАП на основі суми вагових струмів

Значна кількість ЦАП паралельної дії виконані на основі закону Кірхгофа про суму струмів вузла. Якщо кожен струм пропорційний визначеному двійковому, то утворюють суму струмів з тими номерами розрядів, значення яких дорівнює 1. Інші направляються до землі, аби не змінювати роботу генераторів струму та режим роботи джерела опорної напруги. Наприклад, потрібно перетворити двійковий 4-розрядний код в аналоговий сигнал струму. У старшого значущого розряду (СЗР) вага дорівнює $2^3 = 8$, у третього $2^2 = 4$, у другого $2^1 = 2$ і у молодшого (МЗР) $2^0 = 1$. Якщо вага МЗР дорівнює струму $I_1 = 1$ мА, то $I_2 = 2$ мА, $I_3 = 4$ мА, $I_4 = 8$ мА. Наприклад, коду 1001 відповідає струм $I_{вих} = 9$ мА. Якщо формувати струми на основі джерела напруги та точних резисторів, то вимоги до резисторів будуть досить високими. Схема, що забезпечує генерацію та комутацію по заданих законах точних вагових струмів показана на рис.57.

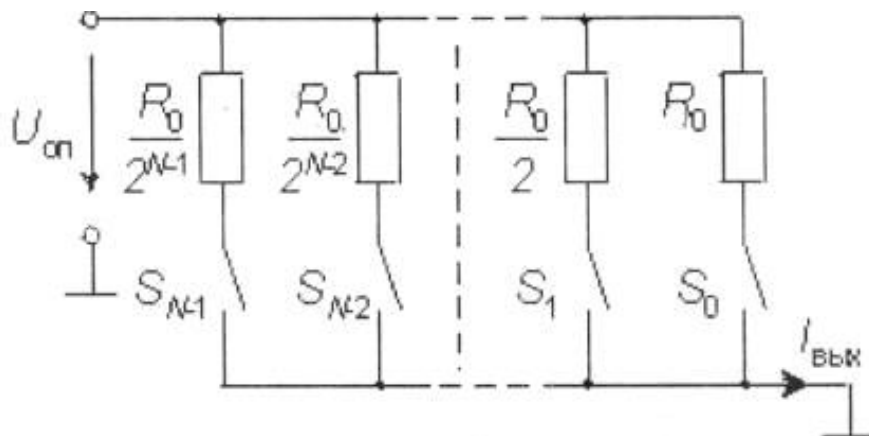


Рис.57. Цап на основі суми вихідних струмів

Вихідний струм визначається співвідношенням

$$I_{вих} = \frac{U_{оп}}{R_0} \sum_{k=0}^{N-1} d_k 2^k = U_{оп} D / R_0.$$

В ЦАП резистори, що задають струм, повинні бути погоджені з високою точністю. Найбільш жорсткі вимоги по точності висуваються до резисторів старших розрядів, оскільки розкид в них не повинен

перевищувати струму молодшого розряду. Тому розкид опору у к-му розряді повинен бути меншим, ніж $\Delta R/R = 2^{-k}$. З цієї вимоги виникає, що розкид опору резистора, наприклад у 10-му розряді не повинен перевищувати 0,05%. Схема ЦАП AD7520 (вітчизняний аналог 572ПА1), що розроблений фірмою Analog Devices, показана на рис.58.

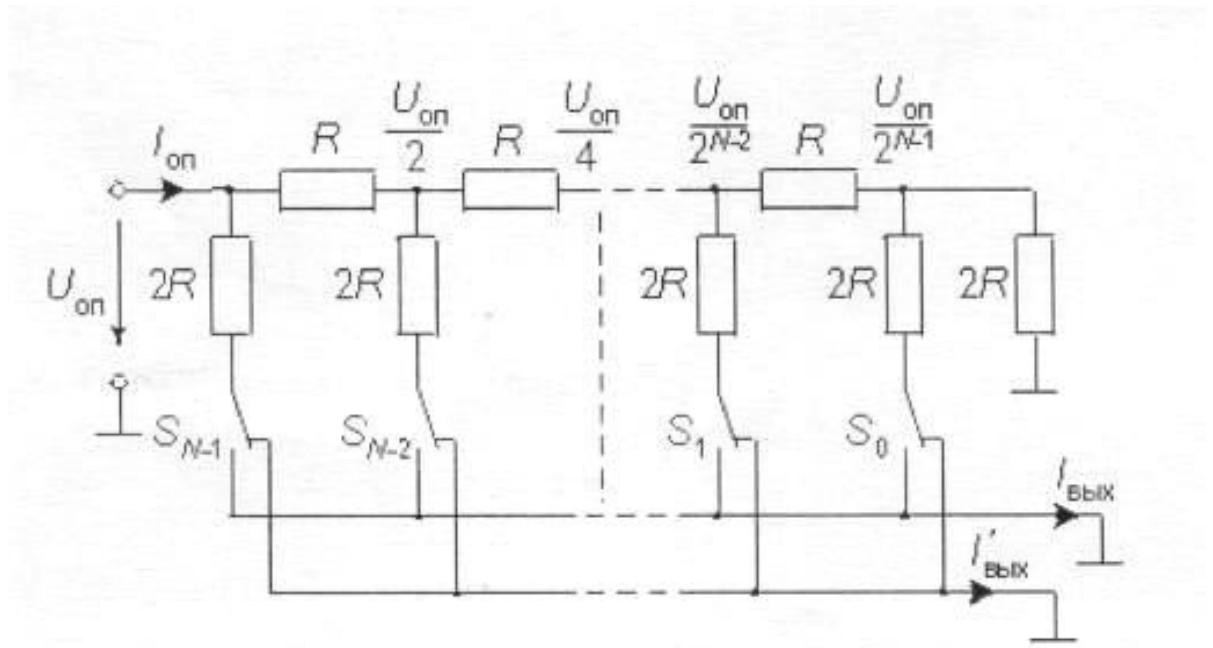


Рис. 58. ЦАП на основі матриці R-2R та суми вихідних струмів

У якості ключів тут використовуються МОН-транзистори.

В цій схемі завдання вагові коефіцієнти перетворювача формуються послідовним діленням опорної напруги за допомогою так званої резистивної матриці R-2R. Ця матриця виконана як подільник напруги, що задовольняє наступній умові: якщо він завантажений опором R_n , то його вхідний опір також повинен приймати значення R_n . Коефіцієнт ослаблення кола $\alpha = U_2/U_1$ при цьому завантаженні повинен мати задане значення. При виконанні цих умов одержуємо наступні вирази для опорів

$$U_{\text{вих}}(N-1) = U_1(N-1) = \frac{U_{\text{оп}}}{2^N} \sum_{k=0}^{N-1} d_k 2^k = \frac{U_{\text{оп}}}{2^N} D$$

$$R_p = \alpha R_H / (1 - \alpha), R_s = (1 - \alpha) R_H.$$

При двійковому кодуванні $\alpha = 0,5$. Якщо покласти $R_H = 2R$, то $R_s = R$, а $R_p = 2R$.

ЦАП на джерелах струму виконуються на основі генераторів струму з високим вихідним опором. Такі генератори можуть бути закорочені на землю без будь-яких наслідків, на віміну від джерел напруги. Такі генератори струму мусять мати високу точність. При виконанні у вигляді ІМС вони мають матричну структуру. У даному разі вагові струми забезпечуються транзисторними джерелами струму, що мають високий динамічний опір. Спрощена схема такого ЦАП наведена на рис.59.

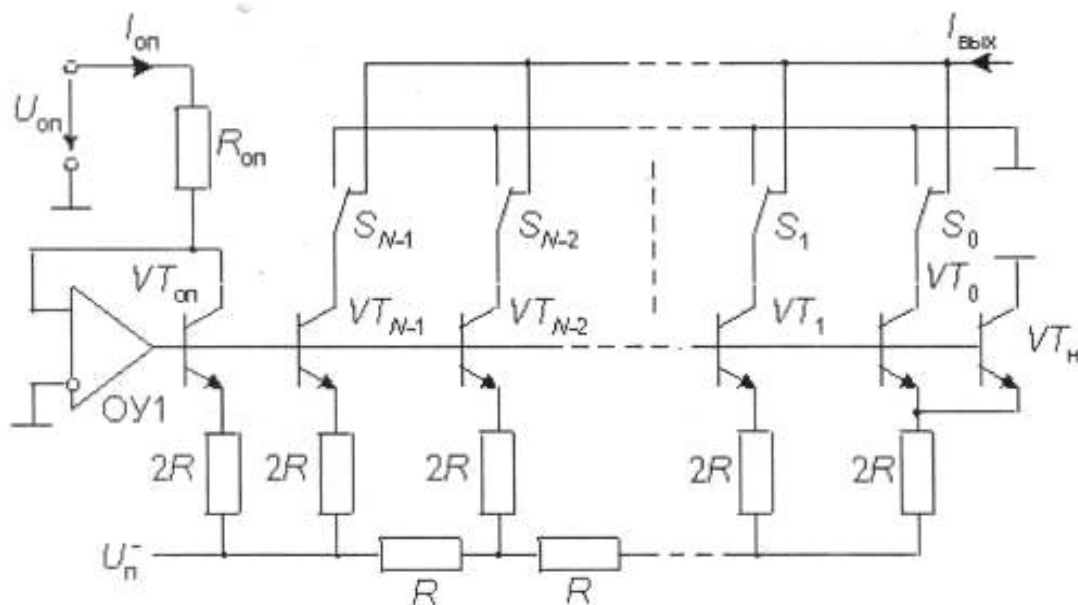


Рис.59. Формування суми вихідних струмів генераторами на біполярних транзисторах

Для формування вагових струмів застосована резистивна матриця R-2R. Потенціали баз транзисторів однакові, а щоб були рівними і потенціали емітерів усіх транзисторів, площі їх емітерів роблять секціями у відповідності до вагових коефіцієнтів. Правий резистор матриці підключений до двох паралельно включених

однакових транзисторів VT_0 та VT_1 . Через це струм через VT_0 дорівнює половині струму через VT_1 . Вихідна напруга для резистивної матриці формується за допомогою жорсткого негативного зворотнього зв'язку через операційний підсилювач ОУ1 та опорний транзистор $VT_{оп}$. Завдякт зворотньому зв'язку вихідна напруга ОУ1 встановлюється такою, що колекторний струм транзистора $VT_{оп}$ приймає значення $I_{оп}$. Вихідний струм для N-розрядного ЦАП $I_{вих} = I_{оп} D/2^N$.

Існує декілька способів формування вихідної напруги для ЦАП з формуванням вихідних струмів на основі закнлу Кірхгофа. Приклад для двох показано на рис.24.

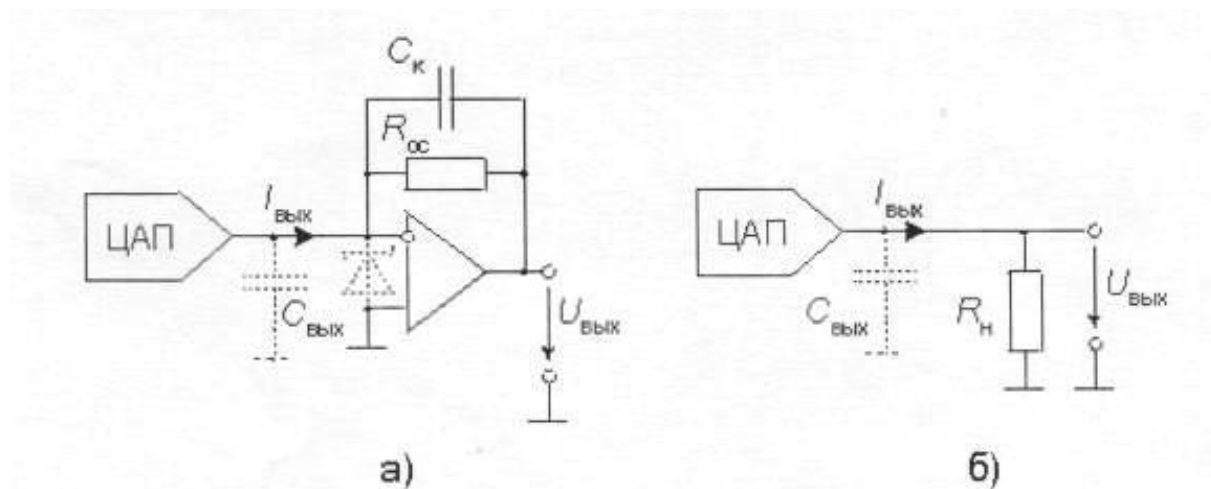


Рис.60. а) Формування вихідної напруги на основі перетворювача струм-напруга на операційному підсилювачі; б) формування вихідної напруги за допомогою резистора.

Перший, рис.60-а, виконано на перетворювачі струм-напруга за допомогою ОП. Їмність C_k разом з вихідним опором ЦАП виконує роль фільтра нижніх частот. Більшість ІМС ЦАП мають велику вихідну ємність. Наприклад, у AD7520 вона в залежності від вхідного коду складає величину 30...120 пФ.

Для ЦАП на основі генераторів струму перетворення вихідного струму у напругу може бути зроблено за допомогою резистора (Рис.60,б). У цій схемі амплітуда вихідної напруги повинна бути невеликою (не більше ± 1 В), аби не спотворити режим роботи

генераторів струму. Це виконується при опорі навантаження $R_H \leq 1$ кОм.

Для ЦАП з МОН-ключами, щоб одержати вихідний сигнал у вигляді напруги, можна використати інверсне включення резистивної матриці (рис.61). Вихідна напруга такого ЦАП

$$U_{out} = \frac{R_H}{R + R_H} \frac{U_{op}}{2^N} D$$

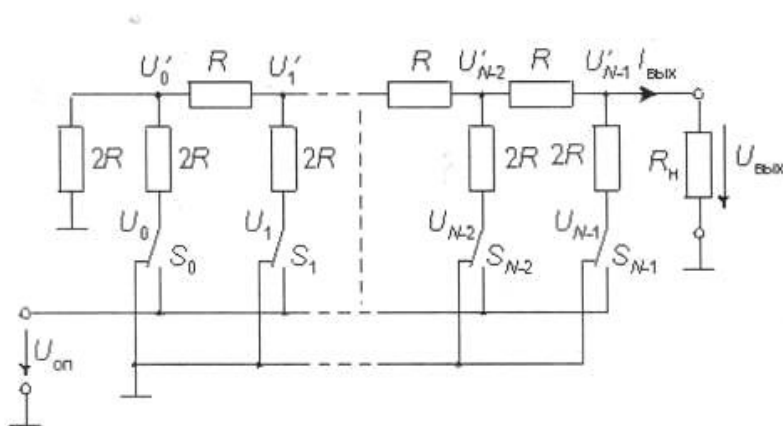


Рис.61. Інверсне включення резистивної матриці

Але ця схема характеризується великим спаданням напруги на ключах, що впливає на відхилення від номіналу навантаження джерела опорної напруги та її дрейф, та значний вихідний опір.

13. Аналого-цифрові перетворювачі

Аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) [15,19] в метрології застосовуються аби напругу, що пропорційна вимірюваній фізичній величині, перетворити у відповідний цифровий код, який придатний для виведення його на цифрове табло, для обробки мікропроцесорами та іншими цифровими пристроями. Зразок класифікації АЦП наведено на рис.62 [19]. АЦП є складними високотехнологічними пристроями.

Основна вимога до сигналів, що потребують перетворення полягає в тому, що вхідний сигнал за час перетворення не повинен змінюватись. Якщо ця умова не виконується і вхідний змінюється в

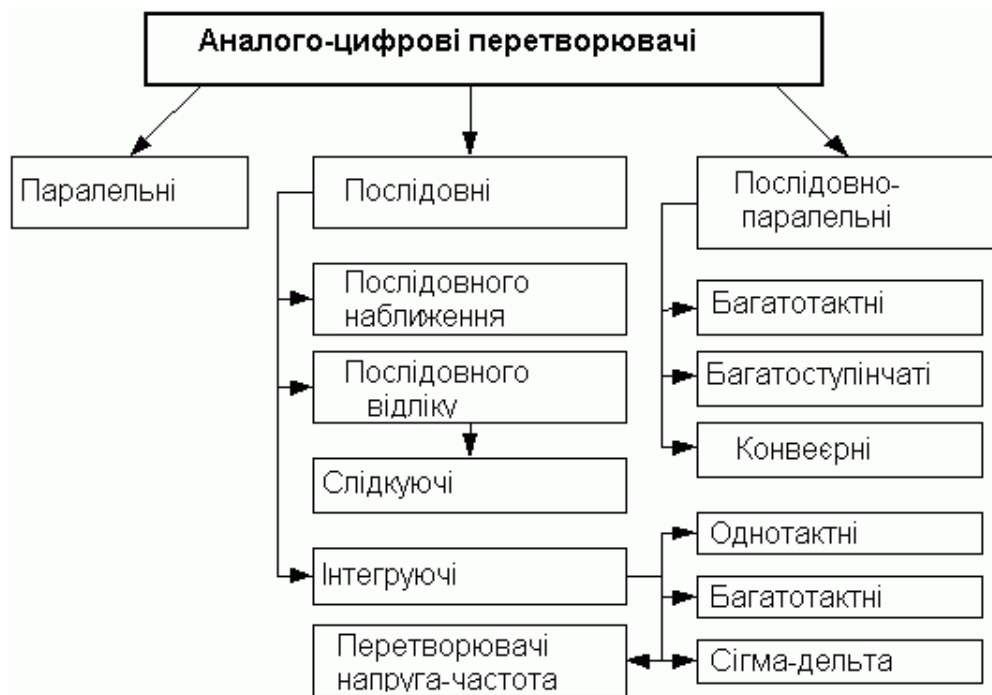


Рис.62. Класифікація АЦП

часі, то в процесі перетворення виникають похибки, які викликані зміною рівня сигналу. Для оцінки такої динамічної похибки вводять поняття *апертурної невизначеності*, яка переважно характеризується апертурним часом.

Апертурним часом t_a називають час, на протязі якого зберігається задана межа відхилення сигналу. Ефект апертурної невизначеності проявляється або як похибка миттєвого значення сигналу при заданих моментах вимірювання, або як похибка моменту часу, в який проводиться вимірювання при заданому миттєвому значенні сигналу.

Для N -розрядного АЦП з роздільною здатністю 2^{-N} апертурна похибка не повинна перевищувати кроку квантування. Наприклад, для забезпечення дискретизації синусоїдального сигналу частота якого 100 кГц з похибкою 1% час перетворення АЦП повинен бути рівним 25 нс. У той же час за допомогою такого швидкодіючого АЦП принципово можна дискретизувати сигнали, які мають ширину спектру біля 20 МГц. Для фіксації рівня сигналу на час аналого-цифрового перетворення,

цю проблему вирішують за допомогою *пристроїв вибірки-зберігання*, що мають малий апертурний час. Приклад схеми виборки та зберігання на основі операційного підсилювача в режимі повторювача сигналу розглянуто в попередньому розділі.

13.1. Паралельні АЦП

АЦП [15,19] цього типу є найшвидшими перетворювачами сигналу у двійковий код. Досягнутий на теперішній час рівень складає 3 ГГц тактової частоти. Для порівняння можна навести приклад, що з такою частотою працює магнетрон в печі надвисокої частоти. З такою ж частотою працюють установки плазмохімічного травлення, де плазма підтримується за допомогою енергії хвиль надвисокої частоти. В таких установках основним джерелом енергії зазвичай виступає теж магнетрон. При аналого-цифровому перетворенню в паралельних АЦП проводять квантування сигналу одночасно за допомогою набору компараторів, які увімкнені паралельно джерелу вхідного сигналу. На рис. 63 наведено реалізацію паралельного методу АЦ-перетворення для 3-розрядного числа. За допомогою трьох двійкових розрядів можна подати вісім різних чисел, включаючи нуль. Отже необхідно сім компараторів. Сім відповідних еквідистантних опорних напруг утворюються за допомогою резистивного дільника.

Якщо прикладена вхідна напруга не виходить за межі діапазону від $\frac{5}{2}h$, до $\frac{7}{2}h$, де $h=U_{оп}/7$ - квант вхідної напруги, який відповідає одиниці молодшого розряду АЦП, то компаратори з 1-го по 3-й встановлюються в стан 1, а компаратори з 4-го по 7-й - в стан 0. Перетворення цієї групи кодів у трьохзначне двійкове число виконує логичний пристрій, що називається пріоритетним шифратором. Діаграма станів пріоритетного шифратора наведена в табл.1.

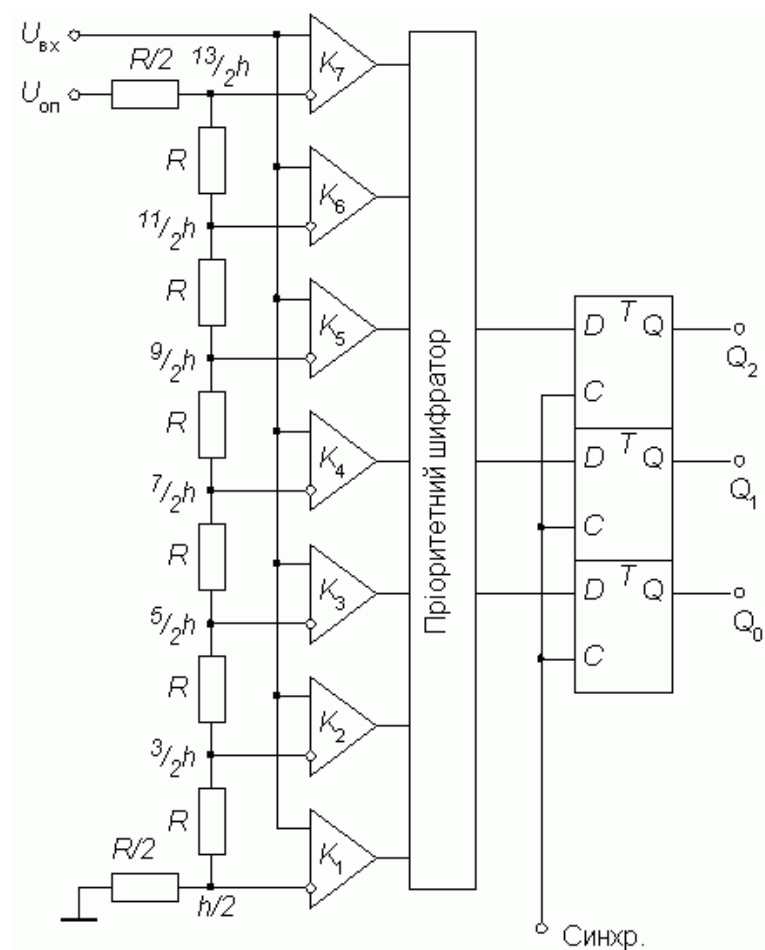


Рис.63 Схема паралельного АЦП

Таблиця 1

Вхідна напруга	Стан компараторів							Виходи		
$U_{вх}/h$	K_7	K_6	K_5	K_4	K_3	K_2	K_1	Q_2	Q_1	Q_0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
2	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0
3	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1
4	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0
5	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1
6	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Завдяки одночасній роботі компараторів параллельний АЦП є самим швидким. Наприклад, AD9208 - це подвійний 14-розрядний аналогово-цифровий перетворювач 3.0 GSPS (ADC). Він має мікросхемний буфер і схему зразків і утримувань, призначених для малої потужності, невеликого розміру та простоти використання. Цей пристрій призначений для підтримки комунікаційних додатків, здатних відбирати аналогові сигнали широкої пропускну здатності до 5 ГГц.

13.2. Послідовно-паралельні АЦП

Послідовно-паралельні АЦП [15,19] мають комбіновану архітектуру і займають проміжне положення за роздільною здатністю та швидкістю між паралельними АЦП та АЦП послідовного наближення. Послідовно-паралельні АЦП розділюються на багатоступінчаті, багатотактні і конвеєрні.

Багатоступінчасті АЦП

У багатоступінчастому АЦП [19] процес перетворення вхідного сигналу розділений на декілька кроків. Як приклад на рис. 64 представлена схема двоступінчастого 8-розрядного АЦП.

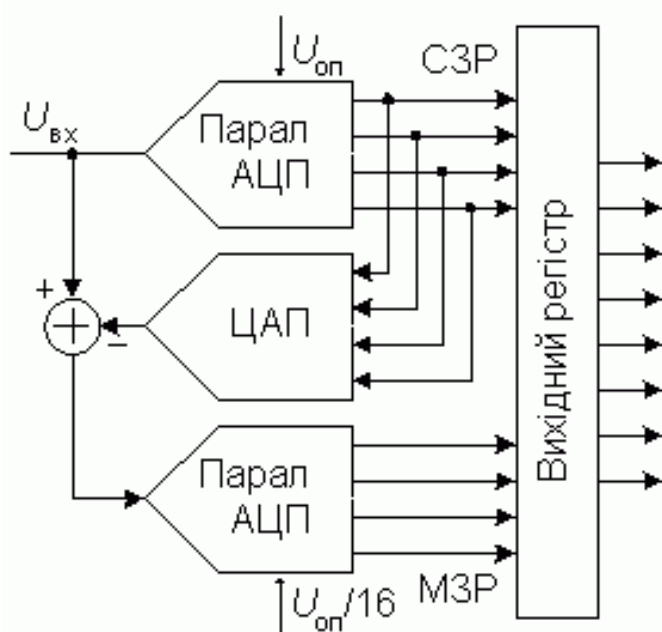


Рис.64 Структурна схема двоступінчастого АЦП

Верхній за схемою АЦП здійснює грубе перетворення сигналу в чотири старших розряди вихідного коду. Цифрові сигнали з виходу АЦП надходять на вихідний регістр і одночасно на вхід 4-розрядного швидкодіючого ЦАП. У багатьох ІМС багатоступінчастих АЦП (AD9042, AD9070 і ін.) цей ЦАП виконаний за схемою підсумовування струмів на диференційних перемикачах, але деякі (AD775, AD9040A і ін.) містять ЦАП з підсумовуванням напруг. Залишок від віднімання вихідної напруги ЦАП із вхідної напруги схеми надходить на вхід АЦП2, опорна напруга якого в 16 разів менша, ніж у АЦП1. Як наслідок, квант АЦП2 у 16 разів менший кванта АЦП1. Цей залишок, перетворений АЦП2 у цифрову форму являє собою чотири молодших розряди вихідного коду. Відмінність між АЦП1 і АЦП2 полягає насамперед у вимозі до точності: у АЦП1 точність повинна бути такий ж як у 8-розрядного перетворювача, у той ж час як АЦП2 може мати точність 4-розрядного.

Багатотактні послідовно-паралельні АЦП

Розглянемо приклад 8-розрядного послідовно-паралельного АЦП [19], що відноситься до типу багатотактних (рис. 65). Тут процес перетворення розділений у часі.

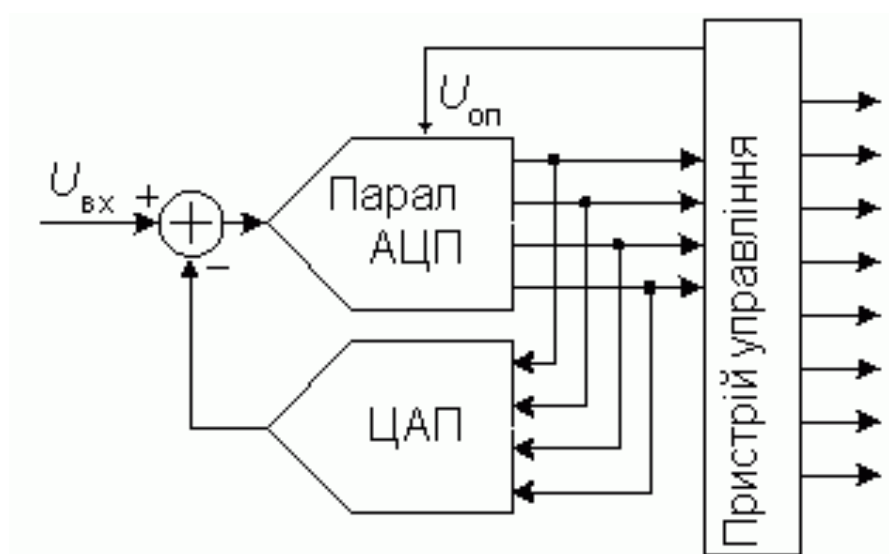


Рис.65. Структурна схема двотактного АЦП

Перетворювач складається з 4-розрядного паралельного АЦП, квант h якого визначається величиною опорної напруги, 4-розрядного ЦАП та пристрою керування. Якщо максимальний вхідний сигнал дорівнює 2,56 В, то в першому такті перетворювач працює з кроком квантування $h_1=0,16$ В. У цей час вхідний код ЦАП дорівнює нулю. Пристрій керування пересилає отримане від АЦП у першому такті слово в чотири старших розряди вихідного регістра, подає це слово на вхід ЦАП і зменшує в 16 разів опорну напругу АЦП. Таким чином, у другому такті крок квантування $h_2=0,01$ В та залишок, що утворився при відніманні з вхідної напруги схеми вихідної напруги ЦАП, буде перетворений у молодший напівбайт вихідного слова.

Очевидно, що використовувані в цій схемі 4-розрядні АЦП та ЦАП повинні мати 8-розрядну точність. Прикладами багатотактних АЦП є тритактний 12-розрядний AD7886 з часом перетворення 1 мкс., або тритактний 16-розрядний AD1382 з часом перетворення 2 мкс.

Конвеєрні АЦП

Швидкодія багатоступінчастого АЦП можна підвищити, застосувавши конвеєрний принцип багатоступінчастої обробки вхідного сигналу. У звичайному багатоступінчастому АЦП (рис. 26) спочатку відбувається формування старших розрядів вихідного слова перетворювачем АЦП1, а потім йде період установлення вихідного сигналу ЦАП. На цьому інтервалі АЦП2 простоює. На другому етапі під час перетворення залишку перетворювачем АЦП2 простоює АЦП1. Ввівши елементи затримки аналогового та цифрового сигналів між ступенями перетворювача, отримаємо конвеєрний АЦП, схема 8-розрядного варіанта якого наведена на рис. 66.

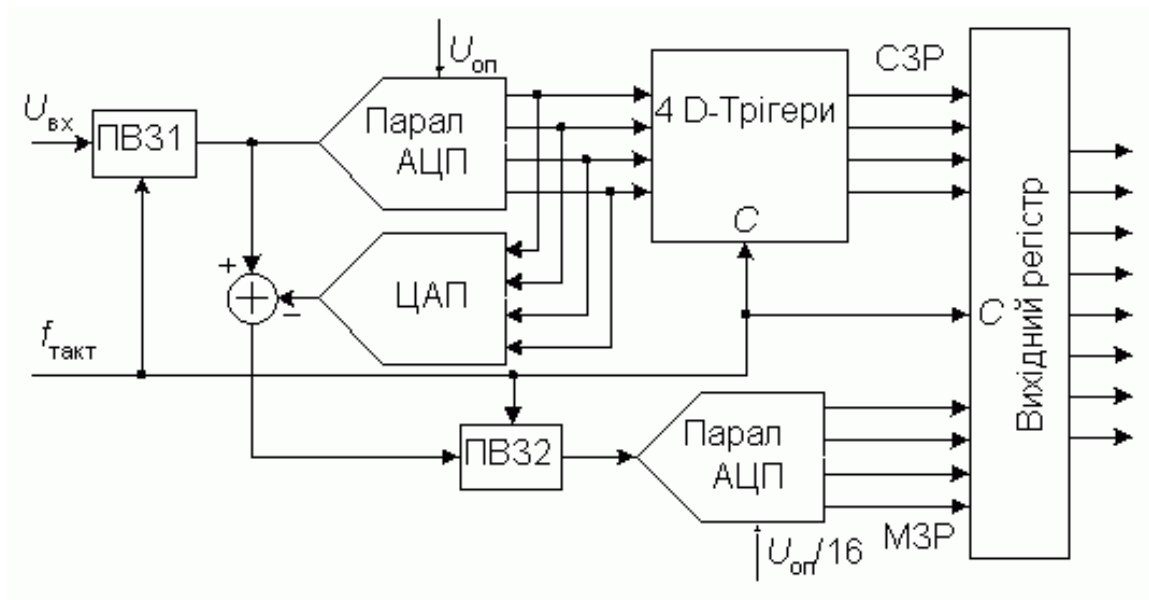


Рис.66 Структурна схема конвеєрного АЦП

Роль аналогового елемента затримки виконує пристрій вибірки-зберігання ПВХ2, а цифрового - чотири D-тригери. Тригери затримують передачу старшого напівбайта у вихідний регістр на один період тактового сигналу CLK.

Сигнали вибірки, що сформовані із тактового сигналу, надходять на ПВХ1 та ПВХ2 у різні моменти часу (рис. 67). ПВХ2 переводиться в режим збереження пізніше, ніж ПВХ1 на час, рівний сумарній затримці поширення сигналу по АЦП1 та ЦАП. Задній фронт тактового сигналу керує записом кодів у D-тригери та вихідний регістр. Повна обробка вхідного сигналу займає біля двох періодів CLK, але частота появи нових значень вихідного коду дорівнює частоті тактового сигналу

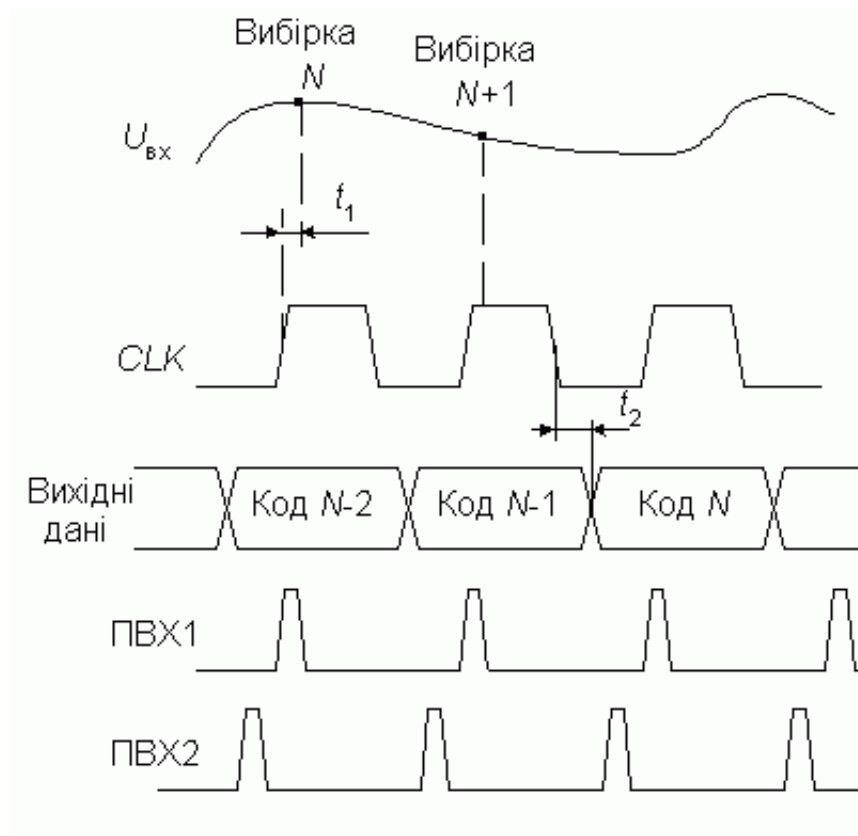


Рис.67 Діаграми роботи конвеєрного АЦП

Таким чином, конвеєрна архітектура дозволяє істотно (у кілька разів) підвищити максимальну частоту вибірок багатоступінчастого АЦП.

13.3. АЦП послідовного відліку

Цей перетворювач є типовим прикладом послідовних АЦП із одиничним наближенням та складається з компаратора, лічильника та ЦАП (рис. 68). На один вхід компаратора надходить вхідний сигнал, а на інший - сигнал зворотного зв'язку з ЦАП.

Робота перетворювача починається з приходу імпульсу запуску, який включає лічильник, котрий підсумовує кількість імпульсів, які надходять від генератора тактових імпульсів ГТІ. Вихідний код лічильника подається на ЦАП, що здійснює його перетворення в напругу зворотного зв'язку $U_{ос}$. Процес перетворення продовжується доти, поки напруга зворотного зв'язку зрівняється з вхідною напругою та переключиться компаратор, який своїм вихідним сигналом припинить

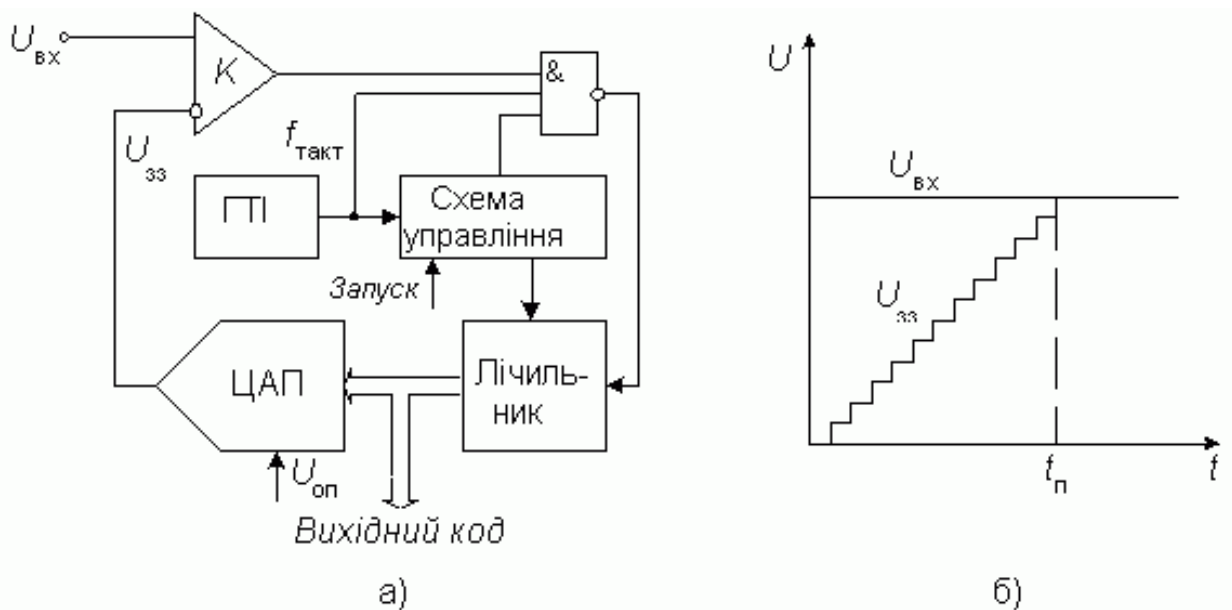


Рис.6.8 Структурна схема АЦП послідовного відліку

надходження тактових імпульсів на лічильник. Перехід виходу компаратора з 1 у 0 означає завершення процесу перетворення. Вихідний код, який пропорційний вхідній напрузі в момент закінчення перетворення, зчитується з виходу лічильника.

Час перетворення АЦП цього типу є змінним та визначається вхідною напругою. Його максимальне значення відповідає максимальній вхідній напрузі та при розрядності двійкового лічильника N та частоті тактових імпульсів $f_{\text{ТАКТ}}$ дорівнює:

$$t_{\text{ін.макс}} = (2^N - 1) / f_{\text{макс}}$$

Наприклад, при $N=10$ та $f_{\text{макс}}=1$ МГц $t_{\text{ін.макс}}=1024$ мкс., що забезпечує максимальну частоту вибірок порядку 1 кГц.

Статична похибка перетворення визначається сумарною статичною похибкою використовуваних ЦАП та компаратора. Частоту лічильних імпульсів необхідно вибирати з урахуванням завершення перехідних процесів в них.

13.4. АЦП послідовного наближення

Перетворювач цього типу, який у літературі також називають АЦП із *порозрядним врівноваженням*, є найбільш розповсюдженим варіантом послідовних АЦП.

В основі роботи цього класу перетворювачів лежить принцип *дихотомії*, тобто послідовного порівняння вимірюваної величини з $1/2, 1/4, 1/8$ та т.д. від можливого максимального її значення. Це дозволяє для N-розрядного АЦП послідовного наближення виконати весь процес перетворення за N послідовних кроків (ітерацій) замість $2^N - 1$ при використанні послідовного відліку та отримати істотний виграш у швидкодії. Так, уже при $N=10$ цей виграш досягає 100 разів та дозволяє отримати за допомогою таких АЦП до $10^5 \dots 10^6$ перетворень у секунду. У той же час статична похибка цього типу перетворювачів, обумовлена в основному використанням у ньому ЦАП, може бути дуже малою, що дозволяє реалізувати роздільну здатність до 18 двійкових розрядів при частоті вибірок до 200 кГц (наприклад, DSP101 фірми Burr-Brown).

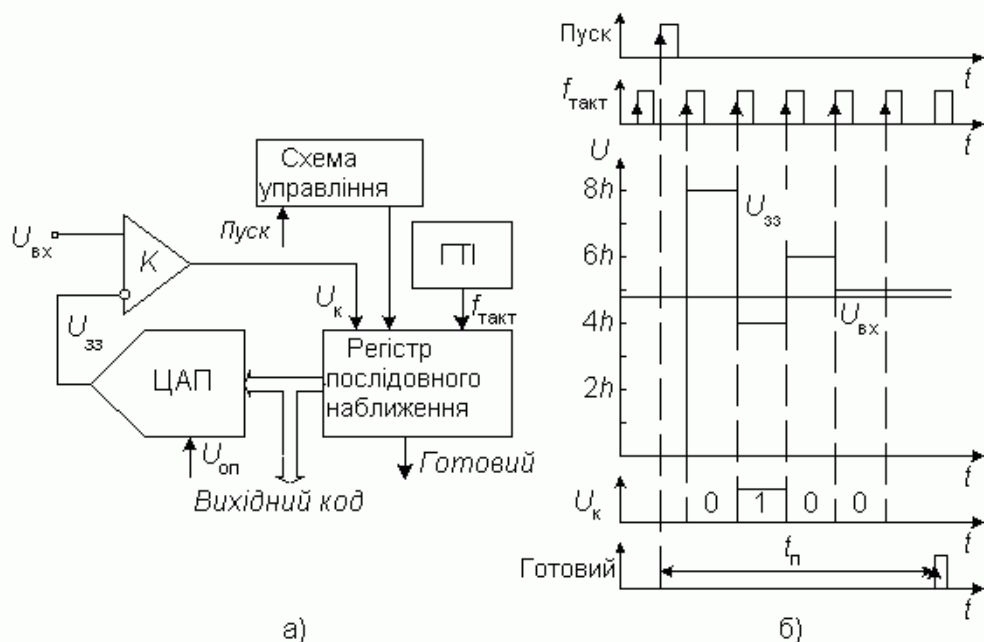


Рис.69. Структурна схема та часові діаграми АЦП послідовного наближення

Розглянемо принципи побудови та роботи АЦП послідовного наближення на прикладі класичної структури (рис. 69а) 4-розрядного перетворювача, що складається з трьох основних вузлів: компаратора, регістра послідовного наближення (РПН) та ЦАП.

Після подачі команди "Пуск" із приходом першого тактового імпульсу РПН примусово задає на вхід ЦАП код, який дорівнює половині його шкали (для 4-розрядного ЦАП це $1000_2 = 8_{10}$). Завдяки цьому напруга U_{oc} на виході ЦАП (рис. 9б)

$$U_{oc} = 2^3 h.$$

де h - квант вихідної напруги ЦАП, що відповідає одиниці молодшого розряду (ОМР). Ця величина складає половину можливого діапазону перетворюваних сигналів. Якщо вхідна напруга більша, ніж ця величина, то на виході компаратора встановлюється 1, якщо менша, то 0. У цьому останньому випадку схема управління повинна переключити старший розряд d_3 назад у стан нуля. Безпосередньо слідом за цим залишок

$$U_{ex} - d_3 2^3 h$$

таким ж чином порівнюється з найближчим молодшим розрядом та т.д. Після чотирьох подібних кроків, що вирівнюють, у регістрі послідовного наближення виявляється двійкове число, з якого після цифро-аналогового перетворення виходить напруга, що відповідає U_{vx} із точністю до 1 ОМР.

13.5. Інтегруючі АЦП

Недоліком розглянутих вище послідовних АЦП є низька завадостійкість результатів перетворення. Дійсно, вибірка миттєвого значення вхідної напруги, переважно включає доданок у виді миттєвого значення завади. Згодом при цифровій обробці послідовності вибірок ця складова може бути утиснена, однак на це потрібен час та обчислювальні ресурси. У АЦП, що розглянуті раніше, вхідний сигнал інтегрується або безупинно, або у визначеному

часовому діапазоні, тривалість якого переважно вибирається кратною періодові завади. Це дозволяє в багатьох випадках придушити заваду ще на етапі перетворення. Платою за це є понижена швидкодія інтегруючих АЦП.

АЦП багатотактного інтегрування

Спрощена схема АЦП, який працює в два основних такти (АЦП двотактного інтегрування), наведена на рис. 70.

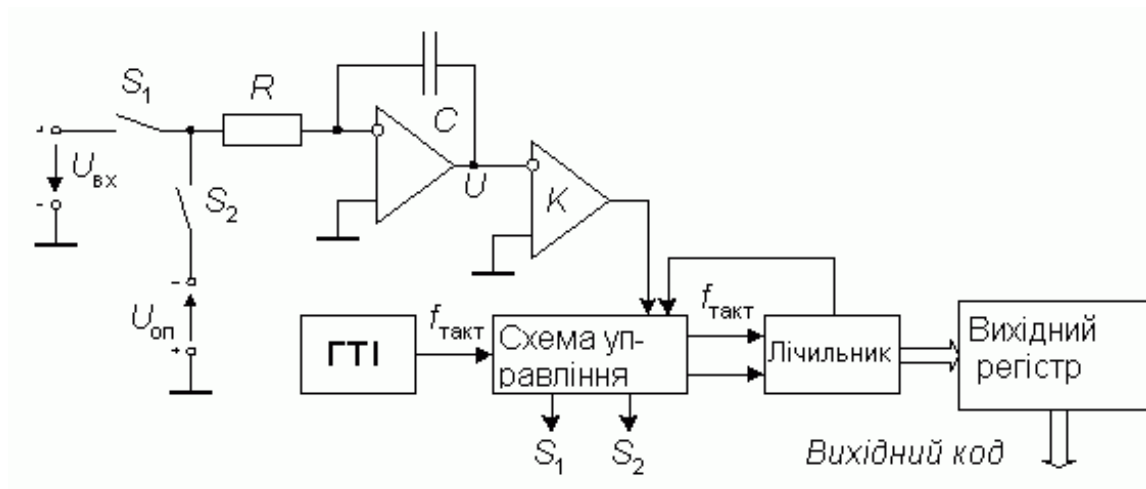


Рис.70. Спрощена схема АЦП двотактного інтегрування

Перетворення проходить на протязі двох стадій: стадії інтегрування та стадії відліку. На початку першої стадії ключ S_1 замкнутий, а ключ S_2 розімкнутий. Інтегратор I інтегрує вхідну напругу $U_{вх}$. Час інтегрування вхідної напруги t_1 постійний; як таймер використовується лічильник з коефіцієнтом перерахування $K_{л}$, так, що

$$t_1 = \frac{K_{сч}}{f_{ТАКТ}}$$

до моменту закінчення інтегрування вихідна напруга інтегратора складає

$$U_{и}(t_1) = -\frac{1}{RC} \int_0^{t_1} U_{вх}(t) dt = -\frac{U_{вх.ср} K_{сч}}{f_{ТАКТ} RC}$$

де $U_{вх.ср}$ - середнє за час t_1 значення вхідної напруги. Після закінчення стадії інтегрування ключ S_1 розмикається, а ключ S_2 замикається та опорна напруга $U_{оп}$ надходить на вхід інтегратора. При цьому

вибирається опорна напруга, протилежна за знаком вхідній напрузі. На стадії відліку вихідна напруга інтегратора лінійно зменшується за абсолютною величиною, як показано на рис. 71.

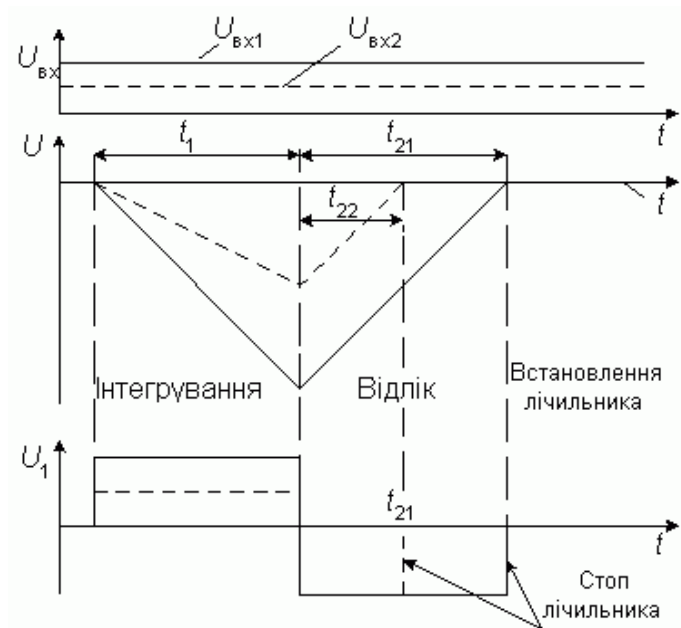


Рис.71. Часові діаграми АЦП двотактного інтегрування

Стадія відліку закінчується, коли вихідна напруга інтегратора переходить через нуль. При цьому компаратор К переключається та відлік зупиняється. Діапазон часу, у якому проходить стадія відліку, визначається рівнянням

$$U_{\text{И}}(t_1) + \frac{1}{RC} \int_{t_1}^{t_1+t_2} U_{\text{ОП}} dt = 0$$

Підставивши значення $U_{\text{та}}(t_1)$ з (7) у (8) з урахуванням того, що

$$t_2 = \frac{n_2}{f_{\text{ТАКТ}}}$$

де n_2 - вміст лічильника після закінчення стадії відліку, отримаємо результат

$$n_2 = \frac{U_{\text{ВХ.СР}} K_{\text{СЧ}}}{U_{\text{ОП}}}$$

З цієї формули випливає, що відмінною рисою методу багатотактного інтегрування є те, що ні тактова частота, ні постійна інтегрування RC не впливають на результат.

13.6. Сіigma-дельта АЦП

Своєю назвою ці перетворювачі зобов'язані наявністю в них двох блоків: суматора (позначення операції - $+$) та інтегратора (позначення операції - \int). Один із принципів, закладених у такого роду перетворювачах, що дозволяє зменшити похибку, внесену шумами, а отже збільшити роздільну здатність - це усереднення результатів виміру на великому діапазоні часу

Основні вузли АЦП - це сіigma-дельта модулятор та цифровий фільтр. Схема n -розрядного сіigma-дельта модулятора першого порядку наведена на рис. 72.

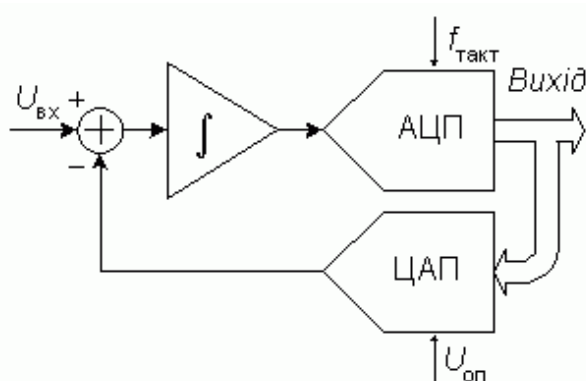


Рис.72 Структурна схема сіigma-дельта модулятора

Робота цієї схеми заснована на відніманні від вхідного сигналу $U_{вх}(t)$ величини сигналу на виході ЦАП, отриманої на попередньому такті роботи схеми. Отримана різниця інтегрується, а потім перетворюється в код паралельним АЦП невисокої розрядності. Послідовність кодів надходить на цифровий фільтр нижніх частот

Порядок модулятора визначається кількістю інтеграторів та суматорів у його схемі. Сіigma-дельта модулятори N -го порядку містять N суматорів та N інтеграторів та забезпечують більше співвідношення сигнал/шум при тій ж частоті відліків, ніж модулятори першого порядку. Прикладами сіigma-дельта модуляторів високого порядку є одноканальний AD7720 сьомого порядку та двохканальний ADMOD79 п'ятого порядку. Найширше в складі ІМС використовуються одnobітні

сігма-дельта модулятори, у яких у якості АЦП використовується компаратор, а в якості ЦАП - аналоговий комутатор (рис. 73).

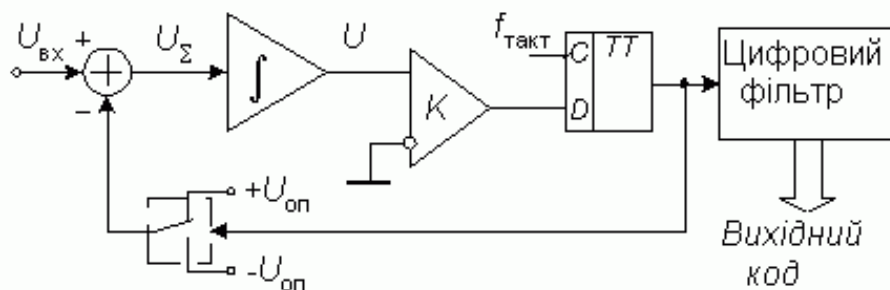


Рис.73 Структурна схема сігма-дельта АЦП

Принцип дії пояснений у табл. 2 на прикладі перетворення вхідного сигналу, рівного 0,6 В, при $U_{оп}=1$ В. Нехай постійна часу інтегрування інтегратора чисельно дорівнює періодові тактових імпульсів. У нульовому періоді вихідна напруга інтегратора скидається в нуль. На виході ЦАП також встановлюється нульова напруга. Потім схема проходить через показану в табл. 9 послідовність станів

Таблица 2

$U_{вх}=0,6$ В					$U_{вх}=0$ В				
N такту	$U_{\square}, \text{У}$	$U_i, \text{В}$	$U_k, \text{біт}$	$U_{\text{ЦАП}}, \text{В}$	N такту	$U_{\square}, \text{У}$	$U_i, \text{В}$	$U_k, \text{біт}$	$U_{\text{ЦАП}}, \text{В}$
1	0,6	0,6	1	1	1	1	1	1	1
2	-0,4	0,2	1	1	2	-1	0	0	-1
3	-0,4	-0,2	0	-1	3	1	1	1	1
4	1,6	1,4	1	1	4	-1	0	0	-1
5	-0,4	1,0	1	1	5	1	1	1	1
6	-0,4	0,6	1	1	6	-1	0	0	-1
7	-0,4	0,2	1	1	7	1	1	1	1
8	-0,4	-0,2	0	-1	8	-1	0	0	-1
9	1,6	1,4	1	1	9	1	1	1	1

10	-0,4	1,0	1	1	10	-1	0	0	-1
11	-0,4	0,6	1	1	11	1	1	1	1
12	-0,4	0,2	1	1	12	-1	0	0	-1
13	-0,4	-0,2	0	-1	13	1	1	1	1
14	1,6	1,4	1	1	14	-1	0	0	-1
15	-0,4	1,0	1	1	15	1	1	1	1
16	-0,4	0,6	1	1	16	-1	0	0	-1

У тактові періоди 2 та 7 стани системи ідентичні, тому що при незмінному вхідному сигналі $U_{\text{вх}}=0,6\text{В}$ цикл роботи займає п'ять тактових періодів. Усереднення вихідного сигналу ЦАП за цикл дійсно дає величину напруги 0,6 В: $(1-1+1+1+1)/5=0,6$.

Наприклад, 24-розрядний сігма-дельта АЦП AD7714 виготовляється у виді однокристалльної ІМС у 24-вивідному корпусі, споживає 3 мВт потужності та коштує приблизно 14 доларів США

15. Рекомендована література

1. Державний стандарт України 2681-94. Метрологія. Терміни та визначення.
2. Державний стандарт України 3834-98. Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювань електро-рушійної сили та постійної напруги
3. Еталон вольт. – Інтернет-ресурс. – www.electronics.ru/files/article_pdf/0/article_612_380.pdf
4. Магніто-електричні прилади. – Інтернет-ресурс. – <https://sites.google.com/site/elizmpribor/Home/klassifikacia-el-izm-priborov/magnitoelektriceskaa-sistema>
5. Цифрові мультиметри. – Інтернет-ресурс. – <https://www.keysight.com/ru/ru/assets/7018-02447/brochures/5990-5315.pdf>
6. Цифрові мультиметри. – Інтернет-ресурс. – <https://www.keysight.com/ru/pcx-2832403/digital-multimeters-dmm?nid=-32052.0&cc=RU&lc=rus>

7. Осциллографы Keysight InfiniiVision 1000 серии X. – Интернет-ресурс. – <https://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/54612-97030.pdf?id=2839839>
8. Осциллографы Keysight InfiniiVision 1000 серии X. – Интернет-ресурс. – <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/54611-97009.pdf?id=2839972>
9. Осциллографы Keysight InfiniiVision 2000 серии X/– Интернет-ресурс. – <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/75015-97054.pdf>
10. Цюцюра С.В., Цюцюра В.Д. Метрологія, основи вимірювань, стандартизація та сертифікація. Друге видання. ISBN 966-81 48-67-3 «Знання», 2005. – 242 с.
11. Сергеев А.Г., Крохин В.В. Метрология. Учебное пособие для вузов. -М.: Логос. 2000 - 408 с
12. Степаненко И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. Изд. 4-е, перераб. и доп. М., «Энергия», 1977, – 614 с.
13. Титце У, Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. – М.: «МИР», 1982. – 512 с., ил.
14. Білінський Й.Й. Огородник К.В., Юкиш М.Й. Електронні системи. – Вінниця, ВНТУ. – 208 с.
15. Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной
16. Цифро-аналогові перетворювачі – Интернет-ресурс. – <https://www.bestreferat.ru/referat-169004.html>
17. Справочное руководство по Electronics Workbench. – Интернет-ресурс. – <http://elanina.narod.ru/lanina/orgevm/popular/wbw/capacp.htm>
18. ЦАП и АЦП. – Интернет-ресурс. – <http://solidstate.karelia.ru/~ivash/ims/t15/DAC.htm>
19. АЦП – Интернет-ресурс. – <http://kaf401.rloc.ru/DSP/ADCtutorial.pdf>